EUROCODE 2

Pratique de l'eurocode 2

Guide d'application

Jean Roux

afnor ÉDITIONS
Algeria-Educ.com
EYROLLES

Pratique de **l'eurocode 2**

Dans la même collection

EUROCODE 2

J.-M. Paillé. – ***Calcul des structures en béton***, G12043, 2009.

J. Roux. – ***Maîtrise de l'eurocode 2 (tome 2)***, G12160, 2009.

EUROCODE 5

Y. Benoit, B. Legrand, V. Tastet. – ***Calcul des structures en bois***, 2e édition, G12481, (à paraître en 2009).

EUROCODE 6

M. Hurez, N. Juraszek, M. Pelcé. – ***Dimensionner les ouvrages de maçonnerie,*** G12280, (à paraître en 2009).

EUROCODE 8

V. Davidovici. – ***Constructions parasismiques*** (à paraître en 2009).

Le programme des Eurocodes structuraux comprend les normes suivantes, chacune étant en général constituée d'un certain nombre de parties :

EN 1990 Eurocode 0 : Bases de calcul des structures

EN 1991 Eurocode 1 : Actions sur les structures

EN 1992 Eurocode 2 : Calcul des structures en béton

EN 1993 Eurocode 3 : Calcul des structures en acier

EN 1994 Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier-béton

EN 1995 Eurocode 5 : Calcul des structures en bois

EN 1996 Eurocode 6 : Calcul des structures en maçonnerie

EN 1997 Eurocode 7 : Calcul géotechnique

EN 1998 Eurocode 8 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes

EN 1999 Eurocode 9 : Calcul des structures en aluminium

Les normes Eurocodes reconnaissent la responsabilité des autorités réglementaires dans chaque État membre et ont sauvegardé le droit de celles-ci de déterminer, au niveau national, des valeurs relatives aux questions réglementaires de sécurité, là où ces valeurs continuent à différer d'un État à un autre.

Pratique de **l'eurocode 2**

Jean Roux

EYROLLES

afnor ÉDITIONS

ÉDITIONS EYROLLES
61, bld Saint-Germain
75240 Paris Cedex 05
www.editions-eyrolles.com

AFNOR ÉDITIONS
11, rue Francis-de-Pressensé
93571 La Plaine Saint-Denis Cedex
www.boutique-livres.afnor.org

Le code de la propriété intellectuelle du 1er juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée notamment dans les établissements d'enseignement, provoquant une baisse brutale des achats de livres, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.
En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans l'autorisation de l'Éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris.
© AFNOR et Groupe Eyrolles, 2009.
ISBN AFNOR : 978-2-12-273211-3
ISBN Eyrolles : 978-2-212-12044-8

Table des matières

Avant-propos 1
1. Présentation des eurocodes et de l'ouvrage 1
2. Références règlementaires 2
3. Numérotation des formules 3
4. Couleurs des figures 4
5. Notations et symboles particuliers 4

Notations et symboles 7
1. Majuscules romaines 7
2. Minuscules romaines 10
3. Majuscules ou minuscules grecques 14

1 Introduction 17
1. Rappels théoriques des unités 17
2. Principe du béton armé 17
2.1 Principe 17
2.2 Exemple 1 – Poutre console 18
2.3 Exemple 2 – Dalle encastrée sur son contour 19
3. Formes usuelles des éléments 20
4. Les différentes méthodes de calcul 21
4.1 Calcul aux contraintes admissibles 21
4.2 Calcul à la rupture 23
4.3 Calcul aux états limites 23

2 Matériaux 25
I. RAPPELS THÉORIQUES 25
1. Aciers 25
1.1 Types 25
1.2 Caractères géométriques 26
1.3 Caractères mécaniques 26
1.3.1 Limite d'élasticité garantie 27
1.3.2 Diagramme contraintes-déformations 28
1.4 Caractères technologiques 29
1.4.1 Surface relative des nervures 29
1.4.2 Autres caractères technologiques 30
2. Béton 30
2.1 Constituants 30
2.1.1 Ciment 30

2.1.2 Granulats 31
2.1.3 Eau 31
2.2 Résistances mécaniques 31
2.2.1 Définition de la valeur caractéristique requise d'ordre p .. 31
2.2.2 Résistance caractéristique à la compression du béton 32
2.2.3 Résistance à la traction 33
2.2.4 Classes de résistance 35
2.2.5 Valeurs à introduire dans les projets 36
2.3 Déformations du béton – Incidence sur le béton armé 37
2.3.1 Déformations spontanées 37
2.3.2 Déformations instantanées – Courbe expérimentale contraintes-déformations (σ_{bc}-ε_{bc}) 41
2.3.3 Déformations lentes sous charges de longue durée 43
2.3.4 Déformations transversales – Coefficient de Poisson 48
II. APPLICATION 49
Détermination du coefficient de fluage et des modules d'élasticité du béton 49
–Énoncé– 49
–Corrigé– 49

3 Béton armé – Généralités 53
I. RAPPELS THÉORIQUES 53
1. Actions et sollicitations 53
1.1 Terminologie 53
1.2 Actions 53
1.3 Combinaisons d'actions 56
1.3.1 Généralités 56
1.3.2 Notations 57
1.3.3 Sollicitations de calcul vis-à-vis des états limites ultimes 57
1.3.4 Sollicitations de calcul vis-à-vis des états limites de service 59
1.3.5 Simplifications pour les dispositions de chargement pour les bâtiments 59
1.3.6 Remarques importantes 60
2. Hypothèses et données pour le calcul du béton armé 61
2.1 Introduction 61
2.2 Hypothèses générales valables pour tous les états limites 63
2.3 Hypothèses supplémentaires pour les états limites de service (ELS) 64
2.3.1 Hypothèses supplémentaires 64
2.3.2 Sections homogènes et sections homogènes réduites 64
2.3.3 Coefficient d'équivalence 65
2.3.4 Limitation de la contrainte de compression du béton 65
2.3.5 Limitation de la contrainte de traction de l'acier 66
2.3.6 Calcul des contraintes 66
2.3.7 États limites de fissuration 67

2.4 Hypothèses supplémentaires pour l'état limite ultime de résistance (ELU) 67
2.4.1 Hypothèses supplémentaires 67
2.4.2 Diagrammes contraintes-déformations de calcul 69

4 Dispositions constructives 75

I. RAPPELS THÉORIQUES 75
1. Généralités 75
1.1 Définitions 75
1.2 Classes d'exposition en fonction des conditions d'environnement 75
2. Disposition des armatures 76
2.1 Enrobage 76
2.2 Enrobage minimal 76
2.2.1 Enrobage minimal $c_{min,\,b}$ requis vis-à-vis de l'adhérence .. 77
2.2.2 Enrobage minimal $c_{min,\,dur}$ vis-à-vis des conditions d'environnement 77
2.2.3 Marge de sécurité $\Delta c_{dur,\,y}$ 78
2.2.4 Réduction $\Delta c_{dur,\,st}$ de l'enrobage minimal dans le cas d'acier inoxydable 78
2.2.5 Réduction $\Delta c_{dur,\,add}$ de l'enrobage minimal dans le cas de protection supplémentaire 78
2.2.6 Prise en compte des tolérances d'exécution 79
2.3 Distances entre barres 79
3. Contrainte d'adhérence 81
3.1 Adhérence des barres droites 81
3.1.1 Définition 81
3.1.2 Faits expérimentaux – Théorie de M. Caquot 81
3.1.3 Facteurs dont dépend l'adhérence 82
3.2 Conditions d'adhérence 83
3.3 Contrainte d'adhérence moyenne 84
3.4 Contrainte ultime d'adhérence 85
3.5 Ancrage des barres droites tendues isolées 86
3.6 Longueur « de scellement droit » 87
3.7 Longueur d'ancrage « de référence » 87
3.8 Longueur d'ancrage « de calcul » 88
3.9 Adhérence des barres courbes 91
3.9.1 Introduction 91
3.9.2 Hypothèses 91
3.9.3 Adhérence des barres courbes 91
4. Ancrage des barres 94
4.1 Types d'ancrages d'extrémité 94
4.2 Rayons de courbure de l'axe des barres 96
4.3 Ancrage total des cadres, étriers et épingles 97
5. Ancrages au moyen de barres soudées 99
5.1 Cas d'une barre transversale de diamètre $14\text{ mm} \le \phi_t \le 32\text{ mm}$ 99
5.2 Cas d'une barre transversale de diamètre $\phi_t \le 12\text{ mm}$ 100

5.3 Cas de deux barres transversales soudées 101
5.3.1 Cas où 14 mm ≤ ϕ_t ≤ 32 mm 101
5.3.2 Cas où ϕ_t ≤ 12 mm 101
6. Efforts exercés par une barre courbe sur le béton 101
6.1 Introduction 101
6.2 Risque de poussée au vide 102
6.3 Risque d'écrasement du béton 103
7. Jonctions par recouvrement 103
7.1 Recouvrement des barres 103
7.1.1 Transmission des efforts 103
7.1.2 Longueur de recouvrement l_0 104
7.1.3 Couture des recouvrements 106
7.1.4 Barres couvre-joints – Jonctions par chaînage 107
7.2 Ancrages et recouvrement des treillis soudés 108
7.2.1 Définition 108
7.2.2 Dispositions des recouvrements 109
8. Paquets de barres 111
8.1 Généralités 111
8.2 Ancrages des paquets de barres 111
8.3 Recouvrement des paquets de barres 112
8.3.1 Cas des paquets de deux barres avec ϕ_n < 32 mm 112
8.3.2 Autres cas 112
9. Règles supplémentaires pour les barres de gros diamètre 113
10. Armatures de peau 114
10.1 Utilité 114
10.2 Constitution 114
10.3 Sections et tracés 114
II. APPLICATIONS 116
Application n° 1 : enrobages 116
–Énoncé– 116
–Corrigé– 116
Application n° 2 : longueur d'ancrage 119
–Énoncé– 119
–Corrigé– 119
Application n° 3 : longueur de recouvrement 124
–Énoncé– 124
–Corrigé– 124

5 Traction simple 129
I. RAPPELS THÉORIQUES 129
1. Introduction 129
2. Dimensionnement des armatures 129
2.1 Énoncé du problème 129
2.2 Dimensionnement à l'ELU 130
2.3 Dimensionnement à l'ELS 130
2.3.1 Contraintes-limites des aciers tendus 130

2.3.2 Section d'armatures 131
2.3.3 Remarque – État limite déterminant pour le calcul des armatures 131
3. Vérification des contraintes 132
3.1 Données 132
3.2 Vérification 132
4. Détermination du coffrage 133
5. Maîtrise de la fissuration 133
5.1 Cas où la maîtrise de la fissuration n'est pas requise 133
5.2 Cas où la maîtrise de la fissuration est requise 134
6. Armatures transversales 134
6.1 En zone courante 134
6.2 En zone de recouvrement 134
6.2.1 Contrainte ultime d'adhérence 134
6.2.2 Longueurs d'ancrage 135
6.2.3 Longueur de recouvrement 135
6.2.4 Armatures transversales 137
II. APPLICATIONS 138
Application n° 1 : tirant – armatures 138
–Énoncé– 138
–Corrigé– 139
Application n° 2 : tirant – armatures et coffrage 146
–Énoncé– 146
–Corrigé– 146

6 Compression centrée 151
I. RAPPELS THÉORIQUES 151
1. Hypothèses 151
2. Élancement 154
2.1 Longueur efficace l_0 154
2.2 Élancement 156
2.2.1 Cas général 157
2.2.2 Cas particuliers 157
3. Armatures longitudinales 158
3.1 Force portante 158
3.2 Armatures longitudinales 159
3.2.1 Armatures calculées 159
3.2.2 Sections extrêmes 159
3.2.3 Dispositions constructives 160
4. Armatures transversales 161
4.1 Diamètres 162
4.2 Espacements 162
4.2.1 En zone courante 162
4.2.2 En zone de recouvrement ou de liaison avec d'autres éléments 162
5. Coffrage 166

II. APPLICATION 166
Application : poteau – coffrage et armatures 166
–Énoncé– 166
–Corrigé– 167

7 Flexion simple 175

I. RAPPELS THÉORIQUES 175
1. Introduction 175
1.1 Définitions 175
1.2 Données générales 176
1.2.1 Notations et terminologie 176
1.2.2 Principes généraux de calcul 177
1.2.3 Équations générales 178
2. Section rectangulaire sans aciers comprimés 180
2.1 Dimensionnement à l'état limite ultime 180
2.1.1 Coefficients de remplissage et de centre de gravité 180
2.1.2 Diagramme parabole-rectangle et rectangulaire simplifié 181
2.1.3 Moment frontière M_{AB} 185
2.1.4 Dimensionnement de $A_{s1,\,u}$ à l'ELU 187
2.1.5 Méthode de calcul dans le cas d'un diagramme d'acier à palier incliné 187
2.1.6 Méthode de calcul dans le cas d'un diagramme d'acier à palier horizontal 189
2.2 Dimensionnement à l'état limite de service par compression du béton 190
2.2.1 Hypothèses 190
2.2.2 Dimensionnement de $A_{s1,\,ser}$ à l'ELS 190
2.3 Notion de moment limite 192
2.3.1 Cas où la contrainte de compression du béton est limitée 192
2.3.2 Cas où la contrainte de compression du béton n'est pas limitée 196
2.4 Conclusion 197
3. Section rectangulaire avec aciers comprimés 198
3.1 Cas où la contrainte de compression du béton est limitée 198
3.1.1 Préambule 198
3.1.2 Hypothèses 198
3.1.3 Remarques préliminaires importantes 200
3.1.4 Calcul des aciers comprimés dans le cas où ceux-ci ne sont pas imposés 201
3.1.5 Calcul des aciers tendus 202
3.2 Cas où la contrainte de compression du béton n'est pas limitée 205
3.2.1 Calcul des aciers comprimés dans le cas où ceux-ci ne sont pas imposés 205
3.2.2 Calcul des aciers tendus 206
3.3 Formules approchées pour l'ELU 208
3.3.1 Bras de levier z_c à l'ELU 208

3.3.2 Moment limite μ_{lu} lorsque la contrainte de compression du béton est limitée 209
3.3.3 Contrainte équivalente des aciers comprimés à l'ELU lorsque la contrainte de compression du béton est limitée 210
3.3.4 Contrainte équivalente des aciers tendus A1 lorsque la contrainte de compression du béton est limitée 213
4. Section rectangulaire dimensionnée à l'état limite de service par limitation des contraintes 214
4.1 État limite de service par limitation des contraintes 214
4.2 Notion de moment résistant béton : M_{rc} 215
4.3 Calcul des armatures 215
4.3.1 Cas où $M_{ser} \leq M_{rc}$ 215
4.3.2 Cas où $M_{ser} > M_{rc}$ et où A_{s2} n'est pas imposée 218
4.3.3 Calcul des aciers tendus lorsque A_{s2} est imposée 219
4.4 Conclusion 220
5. Coffrage des sections rectangulaires 220
6. Sections en T 221
6.1 Introduction 221
6.2 Largeur de table à prendre en compte 221
6.3 Dimensionnement à l'ELU 221
6.3.1 Moment de référence 221
6.3.2 Calcul des armatures 222
6.4 Dimensionnement à l'ELS 224
6.4.1 Moment de référence 224
6.4.2 Calcul de $A_{s1, ser}$ 225
7. Pourcentage minimal d'armatures 226
8. Vérification des contraintes à l'ELS 227
8.1 Introduction 227
8.2 Contraintes dans la section non fissurée 227
8.2.1 Cas des sections en T 227
8.2.2 Cas des sections rectangulaires 228
8.3 Contraintes dans la section fissurée 229
8.3.1 Position de l'axe neutre 229
8.3.2 Calcul des contraintes 230
9. Organigrammes récapitulatifs pour les sections rectangulaires ou en T 232
9.1. Dimensionnement des armatures à l'ELU 232
9.1.1. Cas où la contrainte de compression du béton est limitée à l'ELS 232
9.1.2. Cas où la contrainte de compression du béton n'est pas limitée à l'ELS 239
9.2. Dimensionnement des armatures à l'ELS 242
9.3. Vérification des contraintes à l'ELS 243

II. APPLICATIONS 246
Application n° 1 : section rectangulaire sans aciers comprimés – Calcul des armatures à l'ELU et à l'ELS 246
–Énoncé– 246
–Corrigé– 247
Application n° 2 : section rectangulaire sans aciers comprimés – Notion de moment limite ultime 253
–Énoncé– 253
–Corrigé– 253
Application n° 3 : section rectangulaire sans aciers comprimés – Vérification des contraintes à l'ELS 260
–Énoncé– 260
–Corrigé– 260
Application n° 4 : section rectangulaire avec aciers comprimés ... 266
–Énoncé– 266
–Corrigé– 267
Application n° 5 : section à table de compression 275
–Énoncé– 275
–Corrigé– 276
Application n° 6 : poutre à talon 283
–Énoncé– 283
–Corrigé– 284

8 Effort tranchant 293
I. RAPPELS THÉORIQUES 293
1. Contraintes engendrées par l'effort tranchant 293
1.1 Introduction 293
1.1.1 Effort de glissement 293
1.1.2 Contraintes tangentes 294
1.1.3 Bras de levier des forces élastiques 295
1.2 Contraintes tangentes sur un plan perpendiculaire au plan moyen 295
1.3 Effet des contraintes tangentes 297
2. Équations pour le calcul des armatures d'effort tranchant 299
2.1 Théorie du treillis de Mörsch 299
2.1.1 Introduction 299
2.1.2 Règle des coutures généralisée 299
2.1.3 État limite ultime par écrasement des bielles de béton 301
2.1.4 État limite ultime par traction excessive des armatures d'âme 302
2.1.5 Règle du décalage 304
2.2 Efforts tranchants de référence 306
2.3 Prise en compte des phénomènes de transmission directe des charges aux appuis 307
2.3.1 Cas des charges réparties 307
2.3.2 Cas des charges concentrées 308

3. Éléments pour lesquels aucune armature d'effort tranchant n'est requise 309
3.1 Éléments non concernés 309
3.2 Valeur des efforts tranchants de référence 309
3.2.1 Calcul de $V_{Rd, c}$ 309
3.2.2 Calcul de $V_{Rd, max}$ lorsque les armatures d'effort tranchant ne sont pas requises 311
3.2.3 Force de traction dans l'armature longitudinale 312
3.3 Vérifications 312
3.3.1 Nécessité de prévoir des armatures d'effort tranchant 312
3.3.2 Vérification de la compression des bielles de béton 313
3.4 Pourcentage minimal d'armatures transversales 313
4. Éléments de hauteur constante nécessitant des armatures d'effort tranchant 314
4.1 Valeur de $V_{Rd, c}$ lorsque les armatures d'âme sont nécessaires 314
4.2 Vérification 314
4.3 Principe de la méthode de calcul 315
4.4 Méthode de l'inclinaison variable des bielles 315
4.4.1 Introduction 315
4.4.2 Vérification de la compression des bielles de béton 315
4.4.3 Armatures d'effort tranchant 316
4.4.4 Pourcentage minimal d'armatures transversales 317
4.4.5 Vérification complémentaire pour les charges concentrées au voisinage des appuis 318
4.4.6 Force de traction dans l'armature longitudinale 318
4.4.7 Marche à suivre 319
4.5 Méthode standard – Bielles inclinées à 45° 320
4.5.1 Vérification de la compression des bielles de béton 320
4.5.2 Armatures d'effort tranchant 320
4.5.3 Force de traction dans larmature longitudinale 322
4.6 Comparaison des deux méthodes 322
5. Éléments de hauteur variable 323
6. Dispositions constructives 324
6.1 Inclinaison des armatures d'effort tranchant 324
6.2 Tracé des armatures d'âme 324
6.3 Espacements 325
6.3.1 Espacement longitudinal maximal 325
6.3.2 Espacement transversal maximal 325
7. Barres relevées à 45° 326
7.1 Vérification de la compression des bielles de béton 326
7.2 Armatures calculées 327
8. Répartition des armatures transversales (méthode Caquot) 329
8.1 Hypothèses 329
8.2 Notations 329
8.3 Méthode Caquot 330
8.4 Cas des travées continues 331
8.4.1 Rappels de résistance des matériaux 331

8.4.2 Répartition des armatures d'âme 331
9. Zones d'application des efforts 332
9.1 Armatures inférieures tendues sur appui simple d'about 332
9.1.1 Section d'armatures inférieures 332
9.1.2 Ancrage de l'armature inférieure sur un appui simple d'about 334
9.2 Équilibre de la bielle de béton sur appui simple d'about 334
9.3 Armature inférieure tendue sur appui intermédiaire 335
10. Jonction hourdis-nervure 336
10.1 Introduction 336
10.2 Vérification de la compression des bielles de béton 339
10.3 Armatures de couture 340
10.4 Ancrage des armatures longitudinales supérieures tendues 342
10.5 Interaction entre effort tranchant et flexion transversale pour les ponts 343
11. Poutres à talon 344
12. Organigramme récapitulatif pour le calcul des armatures d'âme . 345
II. APPLICATIONS 352
Application n° 1 : armatures d'effort tranchant – charges réparties 352
–Énoncé– 352
–Corrigé– 353
Application n° 2 : armatures d'effort tranchant – Méthode de l'inclinaison variable des bielles 369
–Énoncé– 369
–Corrigé– 370
Application n° 3 : poutre à talon 380
–Énoncé– 380
–Corrigé– 381

9 Torsion 393
I. RAPPELS THÉORIQUES 393
1. Rappels de résistance des matériaux 393
1.1 Contraintes engendrées par un couple de torsion 393
1.2 Torsion des profils creux 394
1.2.1 Flux du vecteur contrainte 394
1.2.2 Valeur de la contrainte tangente 395
1.2.3 Rigidité à la torsion d'un profil creux 395
1.3 Torsion d'équilibre et torsion de compatibilité 396
2. Sections à considérer 397
2.1 Cas des sections creuses 397
2.2 Cas des sections pleines 397
2.3 Cas des sections de forme complexe 398
3. Principes de la justification à la torsion 399
3.1 Couples de torsion résistants 399
3.2 Principe de la justification 400

4. Vérification de la compression des bielles de béton 401
5. Armatures 402
5.1 Armatures transversales 402
5.1.1 Calcul des armatures 402
5.1.2 Dispositions constructives 403
5.2 Armatures longitudinales 404
5.2.1 Calcul des armatures 404
5.2.2 Dispositions constructives 405
5.2.3 Remarque – Torsion combinée à une flexion simple ou composée 405
6. Sollicitations combinées 406
6.1 Cas général 407
6.2 Cas des sections pleines quasi rectangulaires 407
6.3 Remarque 408
II. APPLICATIONS 409
Application n° 1 : poutre supportant un auvent 409
–Enoncé– 409
–Corrigé– 410
Application n° 2 : torsion dans un tablier de pont courbe 421
–Enoncé– 421
–Corrigé– 422

10 Épures de répartition des armatures longitudinales et des armatures d'âme 431

I. RAPPELS THÉORIQUES 431
1. Introduction 431
2. Répartition des armatures longitudinales 431
2.1 Moment maximal admissible d'un groupe de barres longitudinales 431
2.1.1 État limite ultime 432
2.1.2 État limite de service par limitation des contraintes 432
2.2 Arrêt des barres 432
2.3 Diagramme des moments admissibles 433
2.4 Règle du décalage 435
2.5 Épure d'arrêt des armatures longitudinales 436
2.5.1 Principes 436
2.5.2 Arrêt des armatures inférieures 436
2.5.3 Arrêt des armatures supérieures 437
2.5.4 Remarques 437
2.5.5 Exemple de diagramme de type I 438
2.5.6 Remarques complémentaires 438
3. Répartition des armatures d'âme 440
3.1 Cas des poutres de section constante soumises à des charges uniformes 440
3.2 Cas général 440

11 Flexion composée 443
I. RAPPELS THÉORIQUES 443
1. Généralités – Introduction 443
1.1 Généralités 443
1.2 Prise en compte des imperfections géométriques et des effets du second ordre en flexion-compression à l'ELU 445
1.2.1 Imperfections géométriques 445
1.2.2 Effets du second ordre 446
2. Sections partiellement tendues 449
2.1 Domaine d'application 449
2.1.1 À l'ELS 449
2.1.2 À l'ELU 450
2.2 Calcul des armatures 452
2.2.1 Méthode de calcul 452
2.2.2 Technique du calcul 453
2.2.3 Remarques 453
2.2.4 Positions relatives de $A_{s1, G0}$ et C 454
2.2.5 Cas des sections rectangulaires 454
2.2.6 Section en T à l'ELU 456
2.3 Section minimale d'armatures 458
2.3.1 Cas général 458
2.3.2 Cas où la maîtrise de la fissuration est requise – Calcul rigoureux 459
2.4 Calcul des contraintes à l'ELS 463
2.4.1 Introduction 463
2.4.2 Contraintes dans la section non fissurée 463
2.4.3 Contraintes dans la section fissurée 466
3. Sections entièrement tendues 470
3.1 Domaine d'application 470
3.2 Calcul des armatures 470
3.3 Section minimale 471
3.4 Vérification des contraintes à l'ELS 472
4. Sections entièrement comprimées 472
4.1 Domaine d'application 472
4.1.1 À l'ELS 472
4.1.2 À l'ELU 473
4.2 Calcul des armatures 473
4.2.1 Dimensionnement à l'ELU 473
4.2.2 Dimensionnement à l'ELS 473
4.3 Sections extrêmes 474
5. Diagrammes d'interaction 474
5.1 Équations 475
5.2 Discussion 476
5.2.1 Cas où x est égal à moins l'infini 476
5.2.2 Cas où x est égal à plus l'infini 477
5.2.3 Cas où $N_i = 0$ 478
5.2.4 Cas de la flexion inverse 478

5.3 Courbe d'interaction 478
5.4 Tracé des diagrammes d'interaction 479
5.5 Propriétés des diagrammes d'interaction 479
5.6 Application à la détermination des armatures pour les sections rectangulaires 481
5.6.1 Données 481
5.6.2 Mode opératoire 482
5.7 Application à la vérification des sections rectangulaires 483
5.7.1 Données 483
5.7.2 Mode opératoire 483
5.8 Exemples de diagrammes d'interaction 485
II. APPLICATIONS 487
Application n° 1 : flexion-compression – Section partiellement tendue 487
–Énoncé– 487
–Corrigé– 488
Application n° 2 : flexion-traction – Section partiellement tendue 498
–Énoncé– 498
–Corrigé– 499
Application n° 3 : flexion-traction – Section entièrement tendue 505
–Énoncé– 505
–Corrigé– 505

Annexes

A1 Déformations relatives finales de retrait dans le cas courant d'un béton de classe C25/30 511

A2 Flexion simple – Tableaux des moments limites ultimes réduits 513
1. Diagrammes σ–ε d'aciers à palier incliné 514
2. Diagrammes σ–ε d'aciers à palier horizontal 520

A3 Flexion composée – Moment limite ultime 523
1. Introduction 523
2. Équations utilisées 524
2.1 Équilibre des forces à l'ELU 524
2.2 Effort normal réduit de service 525
2.3 Équilibre des forces à l'ELS 526
2.4 Moment réduit de service 527
2.5 Moment réduit ultime 527
2.6 Principe du calcul 527
3. Organigramme de calcul 528
4. Tableaux des moments limites ultimes en flexion composée 530

Avant-propos

1. Présentation des eurocodes et de l'ouvrage

Le programme des eurocodes structuraux constitue un ensemble de textes cohérents dans le domaine de la construction. Il comporte les normes suivantes, chacune étant, en général, constituée d'un certain nombre de parties :

EN 1990 eurocode 0 : Bases de calcul des structures,
EN 1991 eurocode 1 : Actions sur les structures,
EN 1992 eurocode 2 : Calcul des structures en béton,
EN 1993 eurocode 3 : Calcul des structures en acier,
EN 1994 eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier-béton,
EN 1995 eurocode 5 : Calcul des structures en bois,
EN 1996 eurocode 6 : Calcul des structures en maçonnerie,
EN 1997 eurocode 7 : Calcul géotechnique,
EN 1998 eurocode 8 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes,
EN 1999 eurocode 9 : Calcul des structures en aluminium.

L'eurocode 2, pour sa part, comporte les parties suivantes :

Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments,
Partie 1-2 : règles générales – Calcul du comportement au feu,
Partie 2 : ponts en béton – Calcul et dispositions constructives,
Partie 3 : silos et réservoirs.

Les eurocodes structuraux constituent des normes européennes transposables en normes nationales dans les pays suivants : Allemagne, Autriche, Belgique, Chypre, Danemark, Espagne, Estonie, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Islande, Italie, Lettonie, Lituanie, Luxembourg, Malte, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République Tchèque, Royaume-Uni, Slovaquie, Slovénie, Suède et Suisse.

Les normes nationales transposant les eurocodes comprennent la totalité du texte des eurocodes (toutes annexes incluses). Ce texte peut être :

- précédé d'une page nationale de titres et par un avant-propos national,
- et eventuellement suivi d'une Annexe nationale.

Ces normes nationales sont amenées à se substituer aux textes réglementaires correspondants en vigueur dans les pays européens cités ci-dessus. Ainsi, en France, l'eurocode 2 remplacera définitivement les Règles BAEL 91 pour le béton armé et BPEL 91 pour le béton précontraint en mars 2010.

Le présent ouvrage est établi à partir des normes européennes et de leurs Annexes nationales françaises suivantes :

- EN 1992-1-1 : eurocode 2 : calcul des structures en béton – Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments (décembre 2004),
- EN 1992-2 : eurocode 2 : calcul des structures en béton – Partie 2 : ponts en béton – calcul et dispositions constructives (mai 2006),
- NF EN 1992-1-1/NA : eurocode 2 : calcul des structures en béton – Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments – Annexe nationale à la NF EN 1992-1-1 : 2005 (mars 2007),
- NF EN 1992-2/NA : eurocode 2 : calcul des structures en béton – Partie 2 : ponts en béton – calcul et dispositions constructives – Annexe nationale à la NF EN 1992-2 (avril 2007).

Le lecteur est invité à s'assurer que les documents de référence n'ont pas évolué depuis ces versions.

Nous ne développerons, dans cet ouvrage que les parties de l'eurocode 2 relatives au béton armé, en laissant de côté celles applcables au béton précontraint.

Certaines données et formules ont été volontairement répétées dans plusieurs chapitres pour éviter au lecteur d'effectuer des recherches dans le premier chapitre où elles ont été définies (c'est le cas par exemle de la longueur de flambement qui intervient dans le calcul des poteaux et dans la vérification au flambement).

Le texte qui suit a été rédigé en adoptant les principes énumérés ci-après.

2. Références règlementaires

Les références réglementaires relatives à l'eurocode 2 (parties 1 ou 2), sont indiqués dans des notes de bas de page reprenant les numéros des articles de l'eurocode 2 après le sigle « EC 2 ». La différenciation entre les deux parties s'effectuant par le numéro entre parenthèses qui est supérieur à 100 pour la partie 2 relative aux ponts.

Lorsque ces références ne concernent pas l'eurocode 2, elles sont indiquées de la même façon, sans le le sigle « EC 2 ».

Lorsque le texte réglementaire renvoie à une annexe nationale, la référence portée en bas de page, est : « voir AN » après le sigle « EC 2 ».

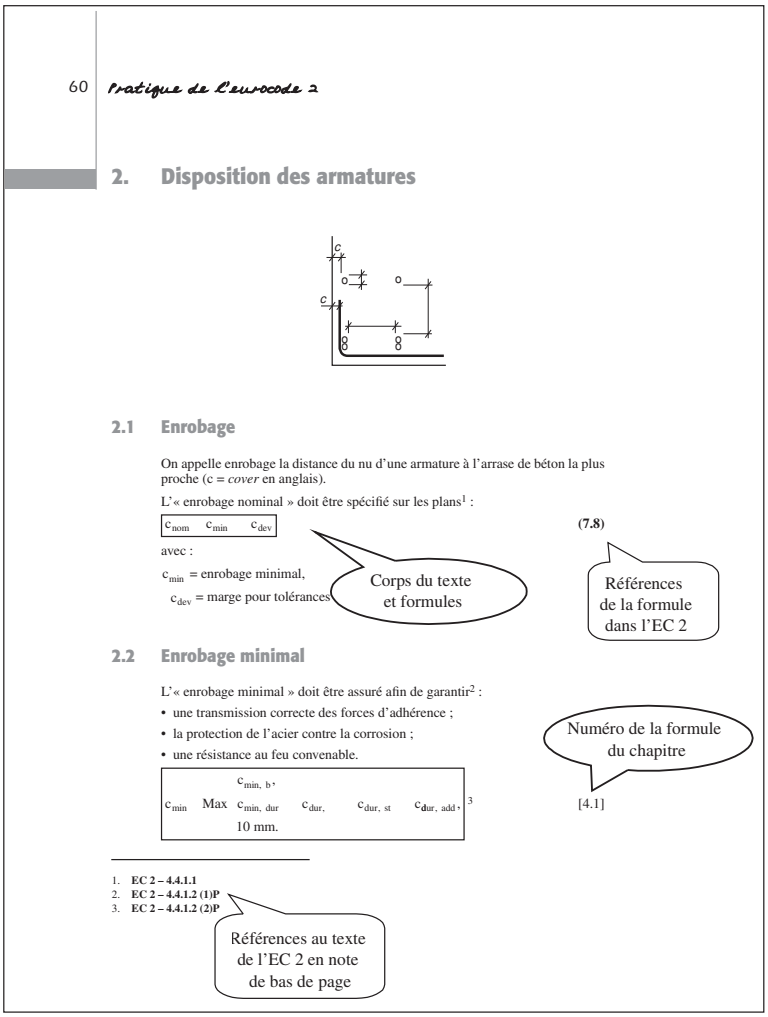
3. Numérotation des formules

Les numéros des formules figurant dans l'eurocode 2 (ou dans tout autre texte réglementaire) sont indiqués, entre parenthèses et en gras, en regard de la formule concernée.

Pour les besoins de l'exposé, lorsqu'il a été nécessaire de numéroter des formules, cette numérotation est indiquée, en caractères normaux placés entre crochets, à la suite de la formule visée. Cette numérotation comporte deux nombres, séparés par un point :

- le premier correspond au numéro du chapitre de l'ouvrage,
- le second est un numéro d'ordre à l'intérieur de ce chapitre.

Exemple :



Les annexes sont repérées de la façon suivante par des renvois situés en bas de page :

- **[Annexe A1]** : pour celles relatives au texte de l'ouvrage (repérage par la lettre A suivi d'un chiffre arabe),
- **[Annexe 1]** : pour celles disponibles en ligne sur www.editions-eyrolles.com sur la fiche de l'ouvrage (repérage par un chiffre arabe),
- **EC 2 – Annexe J 3.2** : pour celles figurant dans les textes règlementaires (repérage, après le sigle EC2, par la lettre de l'annexe suivie éventuellement de chiffres arabes renvoyant au paragraphe de la dite annexe).

4. Couleurs des figures

Les couleurs uilisées pour les figures illustrant cet ouvrage respectent autant que faire se peut les règles suivantes :

1/ pour la résistance des matériaux :
   – rouge : moment fléchissant,
   – bleu : effort tranchant,
   – vert : effort normal, centre de pression.

2/ pour le béton armé :
   – rouge : armatures longitudinales tendues, parties tendues des diagrammes des contraintes ou des déformations,
   – bleu : parties comprimées des diagrammes des contraintes ou des déformations, bielles de béton comprimé,
   – vert : armatures d'âme et armatures transversales.

5. Notations et symboles particuliers

Les symboles et notations utilisés dans cet ouvrage sont conformes aux symboles et notations utilisés dans l'eurocode 2.

Néanmoins, pour plus de clarté, d'autres notations sont apparues nécessaires ; La symbolisation adoptée alors respecte les principes énoncés par ces Règles pour les notations.

La terminologie employée a été parfois volontairement simplifiée pour éviter d'avoir des définitions trop longues. Par exemple, on utilise « section » (ou « aire ») pour désigner « l'aire d'une section droite » ; de même, les termes « moment d'inertie » ou même « inertie » sans autre précision, désignent le « moment d'inertie d'une section à plan moyen par rapport à l'axe perpendiculaire au plan moyen passant par le centre de gravité de celle-ci », etc.

Les sigles ELU et ELS signifient respectivement « état-limite ultime » et « état limite de service ». Le sigle AN signifie « axe neutre ».

Pour ne pas alourdir les formules, le signe multiplié (x) a été systématiquement remplacé par un point (.).

Les symboles utilisés sont les suivants :

- $|X|$ valeur absolue de X,
- cf confer,
- Cste valeur constante,
- O.K. vérification assurée,
- $\sum_{k=1}^{n} A_k$ $\sum_{k=1}^{n} A_k = A_1 + A_2 + ... + A_k + ... + A_n$,
- $\Rightarrow$ implique,
- $\Leftrightarrow$ équivalent à,
- $\not<$ pas inférieur à,
- $\not>$ pas supérieur à,
- $<<$ très inférieur à,
- $>>$ très supérieur à,
- $><$ comparé à,
- $\approx$ sensiblement égal à,
- $\forall$ quel que soit,
- $\neq$ différent de,
- max maximal,
- min minimal.

Le surlignage est utilisé pour distinguer une valeur limite (par exemple une contrainte) définissant un état limite de service).

Notations et symboles

Dans le tableau ci-dessous :

- la première colonne comporte les notations et symboles extraits des Règles eurocode 2 et utilisés dans le présent ouvrage,
- la seconde colonne reprend les définitions attachées aux symboles précédents,
- la troisième colonne indique les notations correspondantes des Règles françaises BAEL 91.

Remarque

Lorsqu'une grandeur figurant dans les Règles EC 2 n'est pas utilisée dans les Règles BAEL 91, la ligne correspondante ne comporte pas de symbole dans la troisième colonne.

1. Majuscules romaines

Notations EC 2	Signification	Notations BAEL 91
A	surface totale d'une section délimitée par le périmètre extérieur, aires des parties creuses comprises (torsion),	
A_c	aire de la section droite (béton seul),	B_0 ou B
$A_{c,\ eff}$	aire de la section effective de béton autour des armatures tendues,	
A_{cont}	aire de contrôle de référence,	
A_{ct}	aire de la zone de béton éventuellement tendu, aire de la zone de béton tendu avant la formation de la première fissure,	B_t
A_d	valeur représentative d'une action accidentelle,	F_A
A_{Ed}	valeur représentative d'une action sismique,	F_A
A_k	aire du contour tracé à mi-épaisseur des parois d'une section creuse,	Ω
A_{load}	aire chargée,	
AN	axe neutre = axe des déformations (ou des contraintes) nulles,	AN

A_s	aire totale des armatures longitudinales tendues, section des barres longitudinales situées dans le talon d'une poutre à talon,	**A**
A_{sf}	section d'un cours d'armatures de liaison (jonction hourdis-nervure),	$A_s + A_i$
$A_{s,\ inf}$	aciers inférieurs d'une dalle,	
$\sum A_{sl}$	section complémentaire d'armatures longitudinales nécessaire pour la torsion,	$\sum A_l$
$A_{s,\ min}$	section minimale d'armatures dans la zone tendue pour la maîtrise de la fissuration,	A_{min}
$A_{s,\ prov}$	section d'armatures effectivement prévue,	
$A_{s,\ req}$	section d'armatures requise par le calcul,	
$A_{s,\ sup}$	aciers supérieurs d'une dalle,	
$A_{s,\ surf}$	section des armatures de peau,	
A_{sw}	section d'une nappe d'armatures d'âme, aire d'un cours d'armatures de poinçonnement sur un périmètre autour d'une aire chargée,	A_t
A_{swr}	section d'une nappe de barres relevées,	A_r
A_{sl}	aire d'une armature longitudinale, aire totale des armatures longitudinales tendues,	A
A_{s1}	section des barres longitudinales situées dans une saillie de table,	A_l
A_{s2}	aire totale des armatures longitudinales comprimées,	A'
$\sum A_{s,\ ink}$	Section totale d'armatures de répartition d'une console courte : • horizontales, • ou verticales,	$\sum A_r$ $\sum A_{tv}$
$A_{s,\ main}$	armatures supérieures tendues d'une console courte,	A
E_{cd}	module d'élasticité de calcul du béton,	
$E_{c,\ eff}$	module d'élasticité effectif tangent du béton,	E_{vj}
E_{cm}	module de déformation instantanée du béton,	E_{bi}
E_s	module d'élasticité de l'acier,	E_s
F_c	résultante des efforts de compression dans le béton,	F_{bc}
F_{Ed}	effort vertical ultime (consoles courtes),	V_u

$F_{Ed,\ sup}$	réaction d'appui,	
F_{sc}	résultante des efforts dans la zone comprimée d'une section,	F_{bsc}
F_{s1}	résultante des efforts dans les armatures tendues,	F_s
F_{s2}	résultante des efforts dans les aciers comprimés,	F_{sc}
$G_{kj,\ sup}$	valeur caractéristique de l'action permanente défavorable,	G_{max}
$G_{kj,\ inf}$	valeur caractéristique de l'action permanente favorable,	G_{min}
H_{Ed}	effort horizontal ultime (consoles courtes),	H_u
I_{cf}	moment d'inertie de la section droite fissurée (section homogène réduite),	I_1
I_{ch}	moment d'inertie de la section droite non fissurée (section homogène non réduite),	
M_{cr}	moment de fissuration,	M_f
M_{lu}	moment limite ultime,	M_{lu}
M_{rc}	moment résistant béton,	M_{rb}
M_{Tser}	moment fléchissant de service de référence pour le calcul des sections en T,	M_{Tser}
M_{Tu}	moment fléchissant ultime de référence pour le calcul des sections en T,	M_{Tu}
M_{Ed}	moment fléchissant ultime,	M_u
M_{0e}	moment du premier ordre équivalent,	
M_{0Ed}	moment du premier ordre (à l'ELU) tenant compte des imperfections géométriques,	
M_{OEqp}	moment de service du premier ordre sous la combinaison d'actions quasi permanente (ELS),	
N_B	charge de flambement évaluée sur la base de la méthode de la rigidité nominale,	
N_{Ed}	effort normal de compression à l'ELU,	N_u
$Q_{k,\ i}$	valeur caractéristique d'une action variable, valeur caractéristique des actions variables « d'accompagnement »,	Q_i
$Q_{k,\ 1}$	valeur caractéristique de l'action variable « dominante »,	Q_1
T_{Ed}	couple de torsion,	T_u

$T_{Rd,\ max}$	couple maximal de torsion auquel peuvent résister les bielles de béton comprimées,	
V_{ccd}	composante parallèle à $V_{Rd,\ s}$ de la force de compression dans la membrure comprimée d'une poutre de hauteur variable,	
V_{Ed}	effort tranchant de calcul à l'ELU dû aux charges appliquées,	V_u
$V_{Rd,\ c}$	effort tranchant résistant de calcul d'un élément sans armatures d'effort tranchant,	
$V_{Rd,\ max}$	effort tranchant de calcul maximal pouvant être supporté sans provoquer l'écrasement des bielles de béton comprimé,	
$V_{Rd,\ s}$	effort tranchant de calcul pouvant être supporté par un élément avec armatures d'effort tranchant travaillant à la limite d'élasticité,	
V_{td}	composante parallèle à $V_{Rd,\ s}$ de la force de traction dans les armatures tendues d'une poutre de hauteur variable.	

2. Minuscules romaines

Notations EC 2	Signification	Notations BAEL 91
a	distances libres verticale ou horizontale entre barres et/ou paquets de barres,	e_v, e_h
a_c	distance de la ligne d'application de F_{Ed} à la face la plus proche du poteau (consoles courtes),	a
a_H	distance de la face supérieure du dispositif d'appui à la ligne moyenne des armatures les plus proches de la face supérieure d'une console courte,	
b_{eff}	largeur participante de la table de compression d'une section en T,	b
b_t	largeur moyenne de la zone tendue d'une section,	b_0
b_w	largeur d'une section rectangulaire, largeur de l'âme d'une section en T,	b_0
c	diamètre d'un poteau, distance des barres longitudinales à la paroi la plus proche (torsion),	
c_{min}	enrobage minimal,	
$c_{min,\ b}$	enrobage minimal vis-à-vis des exigences d'adhérence,	
$c_{min,\ dur}$	enrobage minimal vis-à-vis des conditions d'environnement,	

c_{nom}	enrobage nominal,	
d	distance du centre de gravité des armatures tendues à la fibre la plus comprimée d'une section droite, hauteur utile des armatures les plus proches de la face supérieure d'une console courte,	d
d_g	grosseur maximale des granulats,	c_g
d'	distance du centre de gravité des aciers comprimés à la fibre de béton la plus comprimée,	d'
f_b	contrainte d'adhérence moyenne,	τ_s
f_{bd}	contrainte ultime d'adhérence,	τ_{su}
f_{cd}	contrainte de compression du béton correspondant à la partie rectiligne du diagramme parabole-rectangle,	f_{bu}
f_{ck}	résistance caractéristique à la compression du béton à 28 jours,	f_{c28}
f_{cm}	résistance moyenne à la compression du béton à 28 jours,	
f_{ctd}	résistance de calcul en traction du béton,	
$f_{ctk\ ,\ 0,05}$	résistance caractéristique à la compression d'ordre 0,05,	
$f_{ctk,\ 0,95}$	résistance caractéristique à la compression d'ordre 0,95,	
f_{ctm}	résistance à la traction du béton à 28 jours,	f_{t28}
f_{cu}	contrainte uniforme de compression du béton,	f_{bu}
f_t	résistance à la traction,	
f_{yd}	résistance de calcul des armatures (limite d'élasticité),	f_{ed}
f_{yk}	limite d'élasticité des aciers,	f_e
f_{ywd}	résistance de calcul des armatures d'âme (limite d'élasticité),	f_{etd}
f_{ywk}	limite d'élasticité des aciers transversaux	f_{et}
$f_{0,2k}$	limite caractéristique d'élasticité conventionnelle à 0,2 % d'allongement rémanant de l'acier,	
h	hauteur totale d'une section,	h
h_c	hauteur de la console au niveau de son encastrement dans le poteau,	
$h_{c,\ ef}$	hauteur de la section effective de béton autour des armatures tendues pour le calcul de l'ouverture des fissures,	

h_f	épaisseur de la table de compression d'une section en T	h_0
i	rayon de giration d'une section droite (béton non fissuré),	i
l_b	longueur d'ancrage de référence,	
l_{bd}	longueur d'ancrage de calcul,	
$l_{b,\ eq}$	longueur d'ancrage équivalente (ancrages courbes),	l_a
$l_{b,\ rqd}$	longueur d'ancrage requise,	
l_{eff}	portée utile (de calcul) d'une poutre, d'une travée,	l
l_n	portée entre nus d'appuis,	l
l_0	hauteur utile d'un poteau (longueur de flambement),	l_f
l_0	longueur de recouvrement,	l_r
n	effort normal relatif,	
$\frac{1}{r}$	courbure,	$\frac{1}{r}$
s	espacement des cours d'armatures d'âme	s_t
$s_{cl,\ t}$	espacement des armatures transversales d'un poteau,	s_t ou s'_t
$s_{cl,\ t\,max}$	espacement maximal des armatures transversales d'un poteau,	$\overline{s_t}$, s_{tmax}
$s_{cl,\ t}$	espacement des armatures transversales d'un poteau,	s_t
s_f	espacement des armatures de couture,	s_t
$s_{l,\ max}$	espacement longitudinal maximal des armatures d'effort tranchant,	
s_{max}	espacement longitudinal maximal des armatures d'effort tranchant ou des barres relevées dans une dalle,	
$s_{max,\ slabs}$	espacement des armatures de flexion d'une dalle,	
s_r	espacement radial des cours d'armatures de poinçonnement,	
$s_{r,\ max}$	espacement maximal des fissures,	
s_t	espacement tangentiel des cours d'armatures de poinçonnement,	
$s_{t,\ max}$	espacement transversal maximal des armatures d'effort tranchant,	
s_0	écartement initial des armatures d'âme pour l'application de la méthode Caquot,	s_{t0}

s_l	écartement de départ des armatures d'âme pour l'application de la méthode Caquot,	s_{tl}
t	profondeur d'appui,	
$t_{ef,\ i}$	épaisseur d'un tube creux, épaisseur équivalente du tube creux associé à une section pleine,	e
u	périmètre extérieur d'une section (torsion),	
u_1	périmètre du contour de contrôle de référence,	
u_{1*}	périmètre du contour de contrôle de référence réduit,	
u_k	périmètre de l'aire A_k,	u
v_R	contrainte tangente pour l'effort tranchant,	τ_R
v_{Rd}	Valeur de calcul de la résistance au poinçonnement d'un semelle sans armatures de poinçonnement,	
$v_{Rd,\ c}$	valeur de calcul de la résistance au poinçonnement d'une dalle sans armatures de poinçonnement,	
$v_{Rd,\ cs}$	valeur de calcul de la résistance au poinçonnement d'une dalle avec armatures de poinçonnement,	
$v_{Rd,\ max}$	valeur maximale de calcul de la résistance au poinçonnement d'une dalle,	
x	hauteur de la zone comprimée d'une section droite fléchie,	y
x_u	hauteur de l'axe neutre à partir de la fibre la plus comprimée à l'ELU,	y_u
x_1	hauteur de l'axe neutre à partir de la fibre la plus comprimée à l'ELS,	y_1
v	contrainte tangente,	t
w_k	ouverture calculée des fissures,	
w_{max}	valeur limite de l'ouverture calculée des fissures,	
z	bras de levier des forces élastiques = distance entre F_{sc} et F_{s1},	z
z_0	distance du pied de la bielle à l'axe horizontal des aciers supérieurs tendus (consoles courtes),	z
z_c	bras de levier de la résultante des contraintes de compression du béton par rapport aux aciers tendus à l'ELU = distance entre F_c et F_{s1},	z_b
z_{c1}	bras de levier de la résultante des contraintes de compression du béton par rapport aux aciers tendus à l'ELS = distance entre F_c et F_{s1}.	z_{b1}

3. Majuscules ou minuscules grecques

Notations EC 2	Signification	Notations BAEL 91
α	inclinaison des armatures d'âme sur la ligne moyenne,	α
α_e	coefficient d'équivalence,	n
α_u	hauteur relative de l'axe neutre à l'ELU,	a
α_θ	coefficient de dilatation thermique moyen du béton armé,	α_θ
α_1	hauteur relative de l'axe neutre à l'ELS,	α_1
Δc_{dev}	marge pour tolérances d'exécution,	
$\Delta c_{dur,\ add}$	réduction de l'enrobage minimal dans le cas de protection supplémentaire,	
$\Delta c_{dur,\ st}$	réduction de l'enrobage minimal dans le cas d'acier inoxydable,	
$\Delta c_{dur,\ \gamma}$	marge de sécurité sur l'enrobage,	
ε_c	raccourcissement de la fibre la plus comprimée d'une section,	ε_{bc}
$\varepsilon_{cc}(t)$	déformation unitaire de fluage,	
ε_{cm}	allongement unitaire moyen du béton sur $s_{r,\ max}$,	
ε_{cs} ou $\varepsilon_{cs\infty}$	déformation unitaire de retrait,	
ε_{cu2}	raccourcissement relatif maximal en flexion du béton dans le diagramme parabole-rectangle,	
ε_{cu3}	raccourcissement relatif maximal en flexion du béton dans le diagramme bi-linéaire,	
ε_{c2}	raccourcissement relatif maximal en compression simple du béton correspondant à la contrainte f_{cd} dans le diagramme parabole-rectangle,	
ε_{c3}	raccourcissement relatif maximal en compression simple du béton correspondant à la contrainte f_{cd} dans le diagramme bi-linéaire,	
ε_{sm}	déformation moyenne de l'armature de béton armé sous la combinaison de charges considérée,	
ε_{yd}	allongement des aciers tendus lorsque leur contrainte est égale à leur limite d'élasticité,	ε_{sl}
ε_{s1}	allongement des aciers tendus,	ε_s

ε_{s2}	raccourcissement des aciers comprimés,	ε_{sc}
ε_{ud}	allongement maximal relatif de l'acier tendu dans le cas du diagramme σ–ε à palier incliné,	
$\varphi(t,\ t_0)$	coefficient de fluage,	φ
φ_{ef}	coefficient de fluage effectif,	
ϕ	diamètre d'une barre d'acier,	ϕ
ϕ_{eq}	diamètre équivalent d'un groupe de barres pour le calcul de l'ouverture des fissures,	
ϕ_{large}	diamètre maximal des barres de faible diamètre,	
ϕ_m	diamètre du mandrin de cintrage,	D
ϕ_n	diamètre fictif équivalent d'un paquet de barres,	
γ_c	coefficient de sécurité affectant la résistance de calcul du béton,	γ_b
γ_s	coefficient de sécurité affectant la résistance de calcul des aciers,	γ_s
λ	hauteur relative de la zone de béton uniformément comprimée du diagramme rectangulaire simplifié en flexion simple,	0,8
λ	élancement,	λ
λ_{lim}	Elancement limite d'une pièce comprimée,	
μ_{cu}	moment fléchissant ultime réduit,	μ_{bu}
μ_{lu}	moment fléchissant limite ultime réduit,	μ_{lu}
μ_{rc}	moment résistant béton réduit,	μ_{rb}
$\psi_{0,\ i}.Q_{k,\ i}$	valeur de combinaison d'une action variable,	$\psi_{0,\ i}.Q_i$
$\psi_{1,\ i}.Q_{k,\ i}$	valeur fréquente d'une action variable,	$\psi_{1,\ i}.Q_i$
$\psi_{2,\ i}.Q_{k,\ i}$	valeur quasi permanente d'une action variable,	$\psi_{2,\ i}.Q_i$
ρ_l	pourcentage d'armatures longitudinales,	
$\rho_{p,\ eff}$	pourcentage d'armatures dans la section effective de béton autour des armatures tendues : $A_{c,\ eff}$,	
ρ_w	pourcentage d'armatures transversales,	
$\overline{\sigma_c}$	contrainte limite de compression du béton à l'ELS,	$\overline{\sigma_{bc}}$
$\overline{\sigma_s}$	contrainte limite de traction de l'acier à l'ELS,	$\overline{\sigma_s}$

$\sigma_{Rd,\ max}$	Contrainte maximale de compression d'une bielle de béton,	
σ_s	valeur de la contrainte dans une armature métallique,	σ_s
$\tau_{t,\ i}$	contrainte tangente due à la torsion.	τ_u

1 Introduction

1. Rappels théoriques des unités

- Longueurs en mètres (m). Sous-multiple : 1 cm = 10^{-2} m.
- Forces en newtons (N).
  Multiples : 1 kN = 10^3 N (kilonewton) ; 1 MN = 10^6 N (méganewton).

Remarque

1 MN = 10^5 daN (décanewton) ≈ 10^5 kg (kilogramme) = 100 t (tonne).

- Pressions, contraintes en pascals (Pa) : 1 Pa = 1 N/m^2.
  Multiple : 1 MPa = 10^6 Pa (mégapascal) = 1 N/mm^2.

Remarque

1 MPa = 10 daN/cm^2 = 10 bars ≈ 10 kg/cm^2 = 100 t/m^2.

2. Principe du béton armé

2.1 Principe

Le béton est un matériau qui présente :

- une résistance à la compression relativement élevée (environ 25 MPa) ;
- une résistance à la traction faible et incertaine (environ 2 MPa).

Pour pouvoir utiliser en construction ce matériau économique, on lui associe des armatures métalliques capables d'éviter les inconvénients résultant de sa faible résistance à la traction : le matériau ainsi obtenu est le béton armé.

Le fait d'incorporer des armatures dans le béton n'est pas suffisant pour en faire un béton armé. Il faut en plus une organisation structurale spécifique portant sur :

- la forme des pièces ;
- la quantité et l'agencement des armatures.

Principe

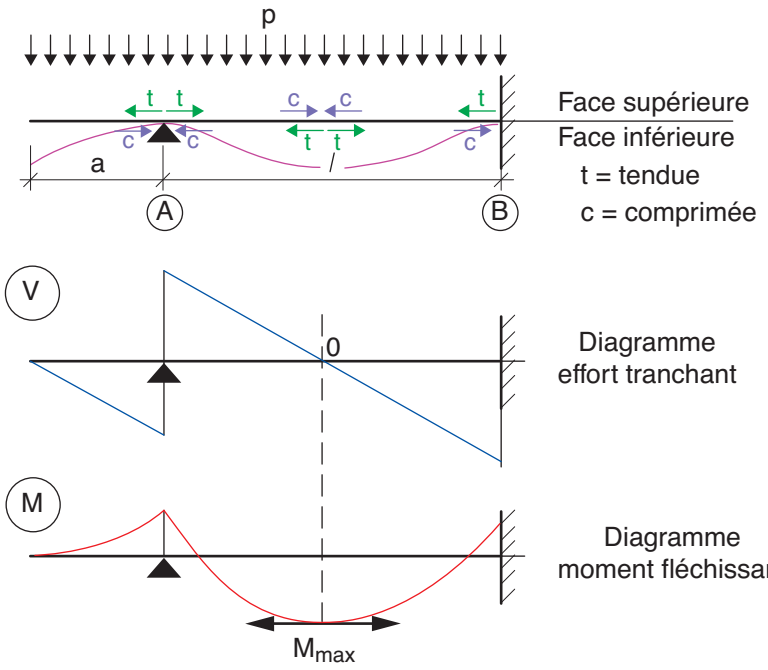
Tout élément doit être armé suivant trois directions non coplanaires, généralement orthogonales.

Toutefois, les éléments de faible épaisseur (dalles) et les semelles de fondation ne sont généralement armés que dans deux directions parallèles à leur feuillet moyen (= plan à mi-épaisseur de l'élément).

2.2 Exemple 1 – Poutre console

Poutre encastrée à une extrémité, reposant librement sur un appui intermédiaire, avec porte-à-faux.

Schéma de résistance des matériaux



Remarque

En béton armé, les moments sont représentés du côté des fibres tendues :

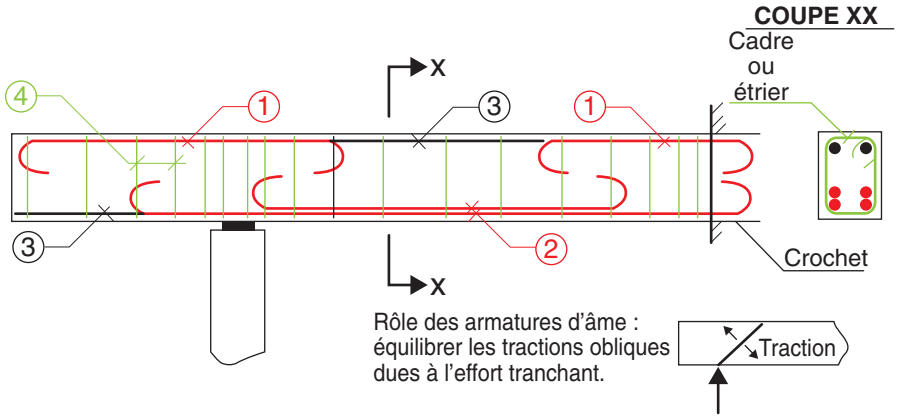
– vers le haut lorsque le moment est négatif ($M < 0$),

– vers le bas lorsque le moment est positif ($M > 0$),

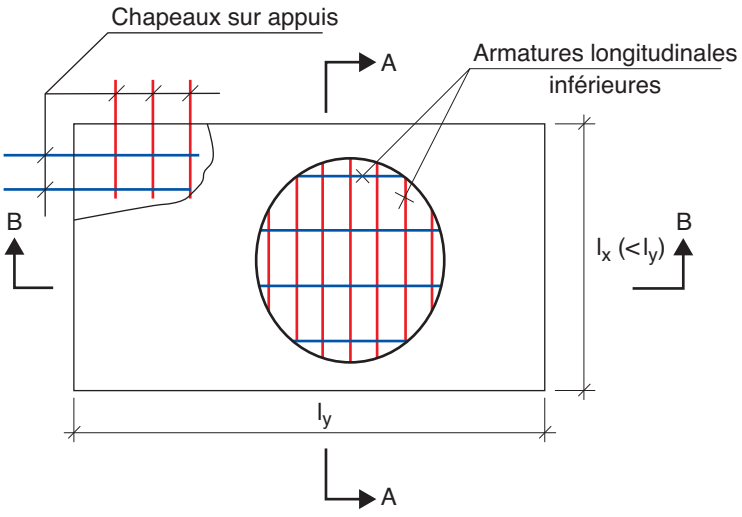
ce qui permet d'obtenir directement la position des armatures tendues (supérieures ou inférieures équilibrant les efforts de traction engendrés par ces moments).

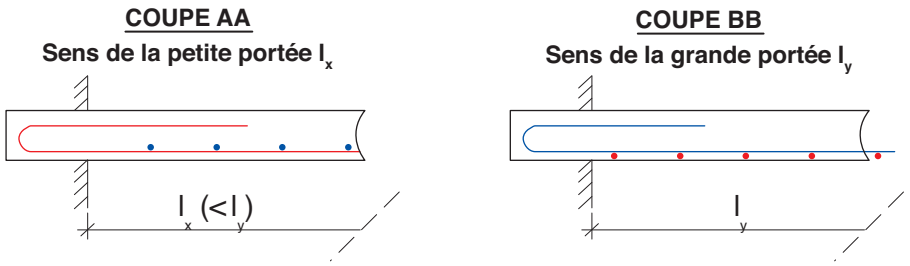
Schéma de ferraillage

①	Armature longitudinale supérieure sur appui (chapeau).
②	Armature longitudinale inférieure.
③	Barre de montage.
④	Armatures d'âme (cadres, étriers).



2.3 Exemple 2 – Dalle encastrée sur son contour

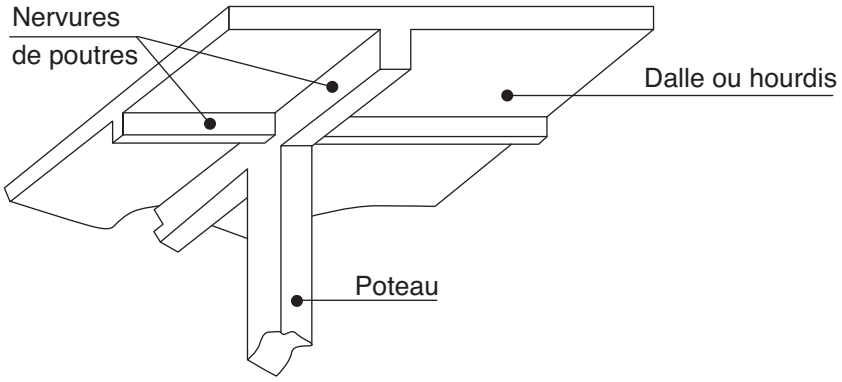




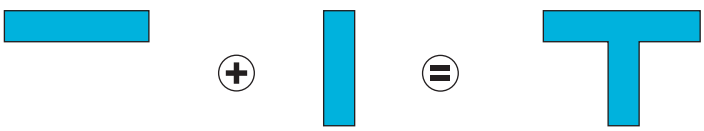
3. Formes usuelles des éléments

En béton armé, on retrouve constamment :

- le poteau, élément vertical porteur ;
- la dalle ou hourdis, plaque plane horizontale de faible épaisseur par rapport à ses dimensions en plan ;
- la nervure, élément prismatique, à section généralement rectangulaire ;
- le voile plan ou courbe délimité par deux surfaces planes ou courbes, l'épaisseur étant faible vis-à-vis des dimensions des surfaces.

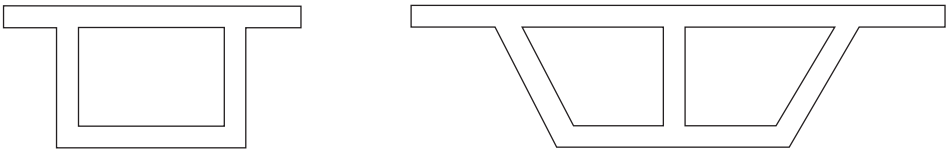


L'association hourdis-nervure constitue une poutre en T ou à table de compression.

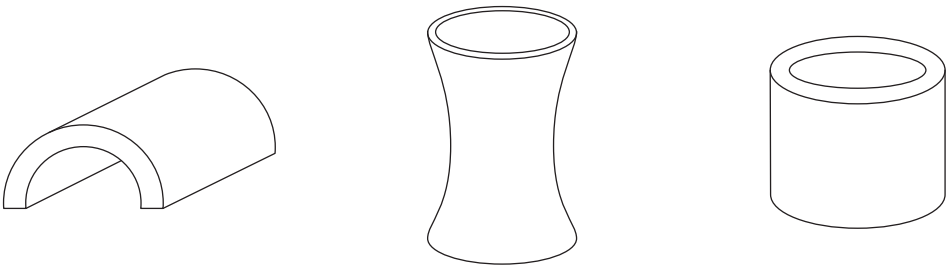


La combinaison poteau-nervure-hourdis donne la solution classique pour réaliser des planchers.

La combinaison voiles plans-hourdis aboutit aux poutres-caissons



Avec des voiles à simple ou double courbure, on réalise des couvertures, des réservoirs, des réfrigérants, etc.



4. Les différentes méthodes de calcul

4.1 Calcul aux contraintes admissibles

Le modèle de calcul est le modèle classique linéaire, les matériaux étant supposés obéir à la loi de Hooke :

$\sigma = - E.\varepsilon$

avec :

σ = contrainte ($\sigma > 0$ pour une compression),

ε = déformation unitaire ($\varepsilon > 0$ pour un allongement),

E = module de déformation.

Pour chacun d'eux, la contrainte σ en service est bornée à une valeur appelée contrainte admissible définie par :

$$\bar{\sigma} = \frac{f}{\gamma_m}$$

avec :

f = « résistance » du matériau considéré :

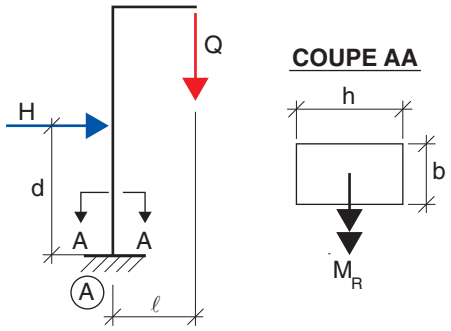
- limite d'élasticité pour l'acier ;
- résistance à la compression ou à la traction pour le béton ;

γ_m = coefficient de sécurité > 1.

On compare la sollicitation agissante S (M, N, V, etc.) obtenue pour une combinaison $\sum_i (F_i)$ d'actions (charges) de service à la sollicitation résistante $\bar{S}$ correspondant au cas où l'un au moins des matériaux atteint sa contrainte admissible. Sous forme symbolique, la sécurité est assurée si :

$$S\left[\sum_i (F_i)\right] = \sum_i \left[S(F_i)\right] \leq \bar{S}\left(\frac{f}{\gamma_m}\right) \qquad [1.1]$$

Exemple :



$$\sum_i [S(F_i)] = M_A = H.d + Q.\ell$$

$$\sigma = \frac{6.M_R}{b.h^2} = \bar{\sigma} = \frac{f}{\gamma_m} \quad \Rightarrow \quad \bar{S}\left(\frac{f}{\gamma_m}\right) = M_R = \frac{1}{6} b.h^2 \frac{f}{\gamma_m}$$

vérification :

$$\boxed{\sum_i \left[S(F_i)\right] = M_A \leq M_R = \bar{S}\left(\frac{f}{\gamma_m}\right)}$$

Cette méthode était celle en usage en France jusqu'en 1983 dans les « Règles CCBA 68 ».

4.2 Calcul à la rupture

Le modèle de calcul est :

- élastique pour les sollicitations ;
- basé sur les lois réelles contraintes-déformations $\sigma - \varepsilon$ pour les matériaux.

On compare la sollicitation agissante S (M, N, V...) obtenue pour une combinaison $\sum_i (\beta_i . F_i)$ d'actions majorées par $\beta_i \geq 1$ à la sollicitation résistante $\bar{S}$ correspondant au cas où l'un au moins des matériaux atteint sa résistance f. Sous forme symbolique, la sécurité est assurée si :

$$S\left[\sum_i (\beta_i . F_i)\right] \leq \bar{S}(f) \qquad [1.2]$$

Les fonctions $S(F_i)$ et $\bar{S}(f)$ n'étant en général pas linéaires et β_i n'étant pas indépendant de F_i, les relations [1.1] et [1.2] ne sont pas identiques. Dans l'exemple du paragraphe 4.1 :

$S\left[\sum_i (\beta_i . F_i)\right] = \beta_H . H.d + \beta_Q . Q.\ell$ avec β_H différent de β_Q, d'où on ne peut mettre $\beta = \beta_H = \beta_Q$ en facteur pour le transférer au dénominateur de $\bar{S}(f)$ afin de le transformer en $\bar{S}\left(\frac{f}{\gamma_m}\right)$. On remarquera de plus que β_H et β_Q sont liés à la nature des actions, tandis que γ_m dépend du matériau.

4.3 Calcul aux états limites

Dans cette méthode on se réfère à tout état (état limite) pour lequel la construction ne répondrait plus à l'un des critères prévus lors de sa conception.

On définit ainsi :

- des états limites ultimes (ELU) :
  - perte de l'équilibre statique ;
  - capacité portante maximale atteinte pour une poutre ou un poteau, etc.
- des états limites de service (ELS) :
  - fissuration excessive ;
  - déformations inacceptables ;
  - etc.

Pour les ELU, on utilise si possible des modèles de calcul plastiques et la méthode s'apparente au calcul à la rupture.

Pour les ELS, le modèle demeure élastique linéaire et la méthode s'apparente au calcul aux contraintes admissibles.

Les lois réelles contraintes-déformations $\sigma-\varepsilon$ sont prises en compte. Dans les calculs, on introduit :

- d'une part, des valeurs caractéristiques des résistances, des actions et des sollicitations obtenues en utilisant des méthodes probabilistes ;
- d'autre part, des coefficients partiels de sécurité γ appliqués à ces valeurs et qui dépendent :
  - de la combinaison d'actions ;
  - de l'état limite considéré ;
  - du matériau.

Une telle méthode est appelée « semi-probabiliste ».

Sous sa forme la plus générale, la condition de sécurité s'écrit symboliquement :

$$\gamma_S . S\left[\sum_i \left(\gamma_{F_i} . F_i\right)\right] \leq \bar{S}\left(\frac{f_k}{\gamma_{mk}}\right)$$

avec :

γ_S = coefficient de sécurité sur la méthode de calcul de la sollicitation,

F_i = action de rang i,

γ_{F_i} = coefficient de sécurité sur l'action F_i,

f_k = résistance du matériau de rang k,

γ_{mk} = coefficient de sécurité sur la résistance du matériau de rang k,

ou de manière simplifiée :

$$S\left[\sum_i \left(\gamma_{Q_i} . F_i\right)\right] \leq \bar{S}\left(\frac{f_k}{\gamma_{mk}}\right)$$

$\gamma_{Q_i} = \gamma_S \cdot \gamma_{F_i}$

Cette méthode est celle des Règles BAEL 91 françaises et de la norme européenne Eurocode 2 que nous nommerons EC 2 par la suite.

2 Matériaux

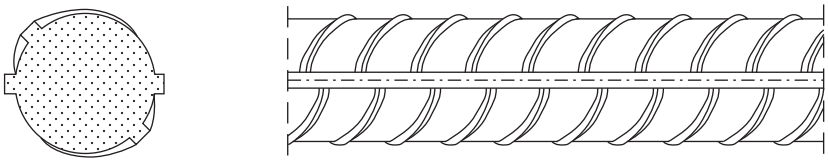
I. RAPPELS THÉORIQUES

1. Aciers

1.1 Types

Aciers en barres laminés à chaud sous forme de[1] :

- ronds lisses bruts de laminage ;
- barres à haute adhérence à surface latérale munie de nervures obliques régulièrement espacées (barres HA).



Ces barres peuvent être :

- en acier naturel (aucun traitement mécanique à la sortie du laminoir) ;
- en acier naturel traité thermiquement ;
- en acier écroui (avec traitement mécanique à froid).

Fils tréfilés et/ou laminés à froid, à surface latérale munie d'empreintes ou de nervures (fils HA).

Treillis soudés obtenus par assemblage de barres ou de fils, lisses ou HA, en mailles carrées ou rectangulaires, avec soudage électrique en usine de chaque point de croisement.

Les propriétés de ces produits sont définies par la norme EN 10080[2].

1. EC 2 – 3.2.1 (1)P
2. EC 2 – 3.2.1 (4)P

1.2 Caractères géométriques

Une barre HA ou un fil HA est caractérisé par un diamètre nominal, désigné par ϕ (= diamètre du rond lisse de même masse linéique).

À chaque diamètre nominal ϕ correspond :

- une section nominale : $A = \frac{\pi.\phi^2}{4}$;
- un périmètre nominal : $p = \pi.\phi$.

Gamme des diamètres nominaux (mm) pour les aciers en barres

ϕ (mm)	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	7	8
Section (cm²)	0,071	0,096	0,126	0,159	0,196	0,238	0,283	0,385	0,50
Poids (kg/m)	0,056	0,076	0,099	0,125	0,154	0,187	0,222	0,302	0,395
Ronds lisses et barres HA							●		●
Fils HA[1)]	●		●		●		●	✶	●
Treillis soudés	●	●	●	●	●	●	●	●	●

1) Diamètre 7 mm pour armatures préfabriquées seulement.

ϕ (mm)	9	10	12	14	16	20	25	32	40
Section (cm²)	0,636	0,79	1,13	1,54	2,01	3,14	4,91	8,04	12,57
Poids (kg/m)	0,499	0,616	0,888	1,208	1,579	2,466	3,854	6,313	9,864
Ronds lisses et barres HA		●	●	●	●	●	●	●	●
Fils HA[1)]	✶	●	●						
Treillis soudés	●	●	●						

1) Diamètre 9 mm pour armatures préfabriquées seulement..

1.3 Caractères mécaniques

Les calculs sont basés sur[3] :

- la résistance à la traction : f_{tk} ;
- la limite d'élasticité caractéristique en traction : f_{yk}
  avec 400 MPa $\leq f_{yk} \leq$ 600 MPa (valeur maximale recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française avec vérification à l'état limite d'ouverture des fissures[4]) ;
- la limite caractéristique d'élasticité conventionnelle à 0,2 % d'allongement rémanant : $f_{0,2k}$;
- la classe de ductilité des aciers ;

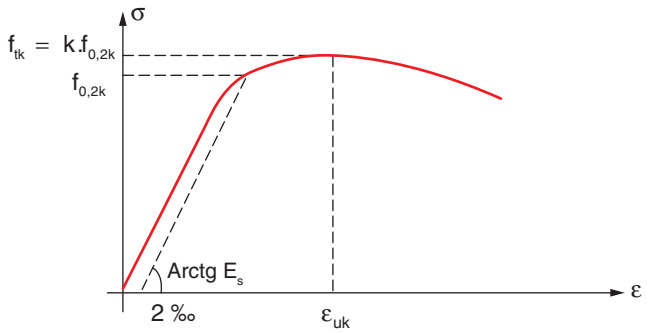
3. EC 2 – 3.2.2
4. EC 2 – 3.2.2 (3)P + ANF

- la forme du diagramme contraintes-déformations : σ–ε ;
- la densité[5] : 7 850 kg/m^3 = 78,5 kN/m^3.

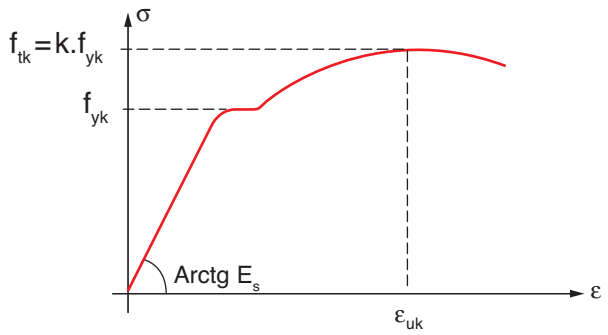
1.3.1 Limite d'élasticité garantie

La valeur caractéristique – f_{yk} – de la limite d'élasticité correspond à une probabilité au plus égale à 5 % de ne pas être atteinte. Elle fait l'objet d'un contrôle permanent en usine[6].

Courbe σ-ε : aciers profilés à froid



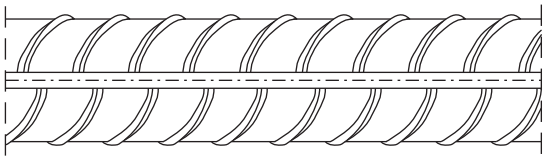
Courbe σ-ε : aciers laminés à chaud



Classes de ductilité[7] :

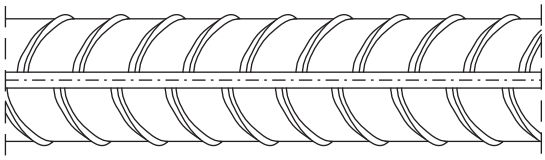
- Classe A = ductilité normale (les nervures sont inclinées dans le même sens de part et d'autre de l'axe de la barre) :

5. EC 2 – 3.2.7 (3)
6. EC 2 – 3.2.4 + annexe C1
7. EC 2 – annexe C1



$$\varepsilon_{uk} \geq 2,5\ \%\ \text{ et }\ k = \left(f_t/f_y\right)_k \geq 1,05$$

- Classe B = haute ductilité (l'inclinaison des nervures est contrariée de part et d'autre de l'axe de la barre – nervures en arêtes de poisson) :



$$\varepsilon_{uk} \geq 5\ \%\ \text{ et }\ k = \left(f_t/f_y\right)_k \geq 1,08$$

- Classe C = très haute ductilité :

$$\varepsilon_{uk} \geq 7,5\ \%\ \text{ et }\ 1,15 \leq k = \left(f_t/f_y\right)_k < 1,35$$

On utilise couramment :

- des ronds lisses : S 220 $f_{yk} = 220$ MPa ;
- des barres à haute adhérence (HA) :

  S 400 A, B ou C $f_{yk} = 400$ MPa ;

  S 500 B ou C $f_{yk} = 500$ MPa $\phi \geq 6$ mm ;

  S 500 A $f_{yk} = 500$ MPa $\phi < 6$ mm ;

- des fils tréfilés laminés à froid et des treillis soudés formés de ces fils (TSHA) : S 500 A $f_{yk} = 500$ MPa $\phi < 6$ mm.

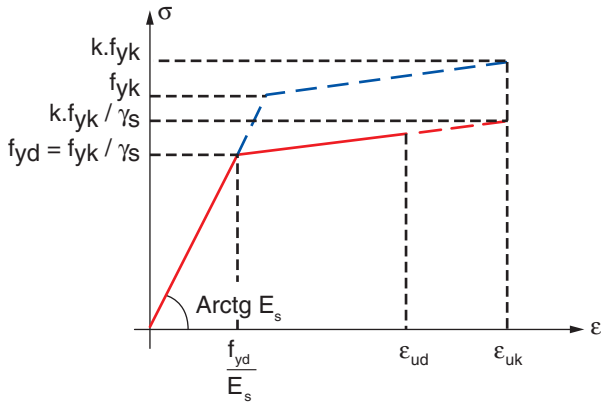
Pour les ponts, les classes de ductilité recommandees sont les classes B et C[8].

1.3.2 Diagramme contraintes-déformations

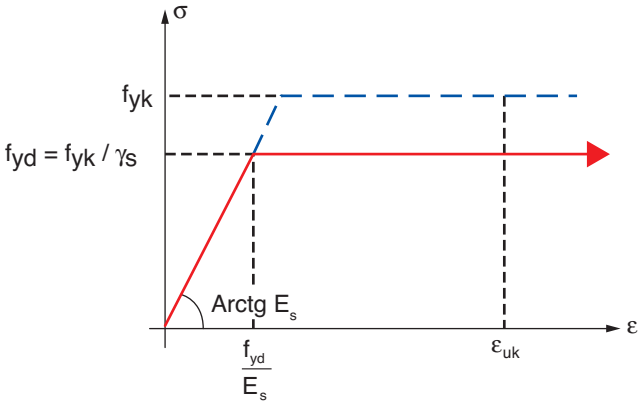
On substitue aux diagrammes expérimentaux des diagrammes idéalisés choisis de manière à donner des approximations allant dans le sens de la sécurité[9].

8. EC 2 –3.2.4 (101)P
9. EC 2 – 3.2.7

Pour le calcul des sections, on peut utiliser l'un ou l'autre des deux diagrammes idéalisés suivants :



ou



avec : $k = \left(f_t / f_y\right)_k$ et $E_s = 2.10^5$ MPa

1.4 Caractères technologiques

1.4.1 Surface relative des nervures

C'est la surface des nervures projetée sur la section droite de la barre et rapportée à la circonférence nominale[10] :

10. EC 2 – annexe C1

$$f_R = \frac{k.F_R.\sin\beta}{\pi.\phi.c} > \begin{cases} 0,035 \text{ si } \phi \le 6 \text{ mm} \\ 0,040 \text{ si } 6,5 \text{ mm} \le \phi \le 12 \text{ mm} \\ 0,056 \text{ si } \phi > 12 \text{ mm} \end{cases}$$

avec :

k = nombre de files de nervures obliques transversales,

F_R = aire de la section longitudinale d'une nervure selon son axe,

β = angle formé par les nervures transversales avec l'axe de la barre,

ϕ = diamètre nominal de la barre,

c = équidistance entre les sections droites passant par les points homologues de deux nervures transversales consécutives de la même file.

1.4.2 Autres caractères technologiques

Pour mémoire[11] :

- pour les barres, aptitude au façonnage déterminée par des essais[12] ;
- aptitude au soudage (basse teneur en carbone et en « résiduels » – définition d'une limite par référence à un carbone équivalent). Tous les aciers pour béton armé sont soudables[13] ;
- résistance à la fatigue[14].

2. Béton

2.1 Constituants

2.1.1 Ciment

Ciment Portland artificiel :

- sans ajouts (CPA–CEM I) ;
- avec ajouts (CPJ–CEM II/A).

Classes courantes (valeurs minimales de la résistance à la compression du ciment à 28 jours d'âge en MPa) :

- classe 42,5 (cas le plus fréquent) ;
- classe 53,5.

Dosage = poids de ciment par m^3 de béton mis en œuvre :

- de 300 à 400 kg/m^3 ;
- 350 kg/m^3 = dosage le plus fréquent.

11. EC 2 – annexe C1
12. EC 2 – 3.2.2 (6)P
13. EC 2 – 3.2.2 (2)P et 3.2.5
14. EC 2 – 3.2.6 (1)P

2.1.2 Granulats

Grosseur maximale : $d_g = 15$ à 25 mm (valeur la plus fréquente).

2.1.3 Eau

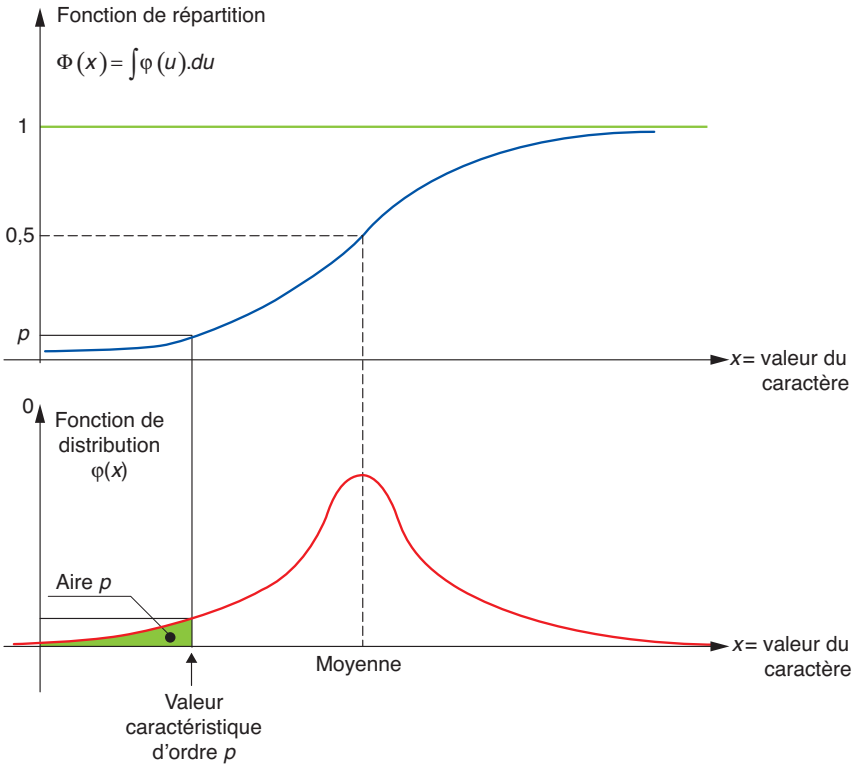
Dosage déterminé par une étude de composition du béton.

La quantité d'eau nécessaire à l'hydratation du ciment est égale au quart du poids de celui-ci, soit environ 90 litres pour un dosage de 350 kg/m^3 (E/C = 0,25 : consistance de terre humide).

Mais pour avoir un béton « maniable », cette quantité doit être doublée (environ 180 litres : E/C = 0,50). Il en résulte qu'un mètre cube de béton contient environ 90 litres d'eau libre non combinée.

2.2 Résistances mécaniques

2.2.1 Définition de la valeur caractéristique requise d'ordre *p*



Étant donné une distribution statistique des valeurs d'un caractère :

- soit potentielle (avant toute fabrication du matériau) ;
- soit réelle (correspondant à une fabrication) ;

on appelle « valeur caractéristique d'ordre *p* » la valeur d'un caractère telle que la population des valeurs qui lui est inférieure est égale à p ($0 < p < 1$). p est appelé fractile.

2.2.2 Résistance caractéristique à la compression du béton

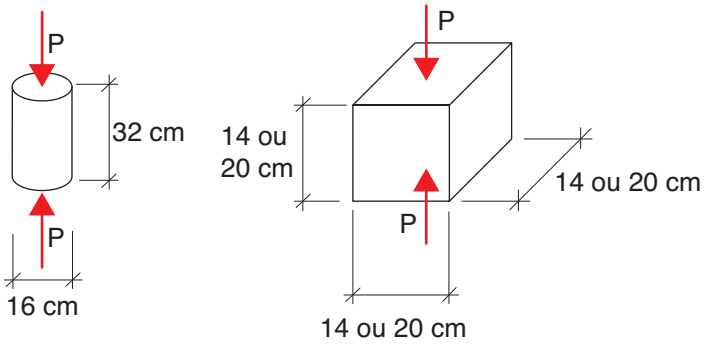
Pour l'établissement d'un projet, le béton est défini par la valeur caractéristique spécifiée (c'est-à-dire précisée par le marché ou le contrat) de sa résistance à la compression à 28 jours notée f_{ck} et correspondant à une probabilité au plus égale à 5 % de ne pas être atteinte[15] (p = 5 %).

La population de résultats n'existant pas encore lors du projet, cette valeur est nécessairement toujours choisie a priori. On est guidé dans ce choix :

- pour le béton fabriqué sur le chantier : par les résultats statistiques obtenus sur des chantiers antérieurs comparables ou par une étude préalable du béton envisagé ;
- pour le béton prêt à l'emploi : par les circulaires d'agrément des centrales de fabrication.

Pour les contrôles, la résistance à la compression f_{ck} est mesurée par écrasement à la presse hydraulique d'éprouvettes :

- cylindriques :
  - de 16 cm de diamètre ;
  - de 32 cm de hauteur ;
  - dont l'aire de la section droite est de 200 cm^2 = 0,02 m^2 ;
- ou bien cubiques de 14 ou 20 cm de côté.



15. EC 2 – 3.1.2 (1)P

Dans le cas des éprouvettes cylindriques – généralement prises en considération pour définir la résistance caractéristique à la compression du béton –, on a :

$$f_{ck} = \frac{P}{0,02} \quad \text{(MPa)}$$

P = charge de rupture en MN.

Pour 3 jours < t < 28 jours , la résistance à la compression est déterminée par essais directs, ou à défaut par[16] :

$$f_{ck}(t) = f_{cm}(t) - 8 \text{ MPa}$$

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t).f_{cm} \qquad \textbf{(3.1)}$$

avec :

$f_{cm} = f_{ck} + 8$ MPa = résistance moyenne en compression du béton à 28 jours,

$$\beta_{cc}(t) = e^{s\left[1-\sqrt{\frac{28}{t}}\right]} \qquad \textbf{(3.2)}$$

où :

$$s = \begin{cases} 0,20 : \text{ciment de classe R (CEM 42,5 R, CEM 52,5 N et CEM 52,5 R)} \\ 0,25 : \text{ciment de classe N (CEM 32,5 R et CEM 42,5 N)} \\ 0,38 : \text{ciment de classe S (CEM 32,5 N)} \end{cases}$$

Pour $t \geq 28$ jours : $f_{ck}(t) = f_{ck}$ [17]

2.2.3 Résistance à la traction

La résistance à la traction du béton à 28 jours – f_{ctm} – est déterminée par des essais de traction directe[18].

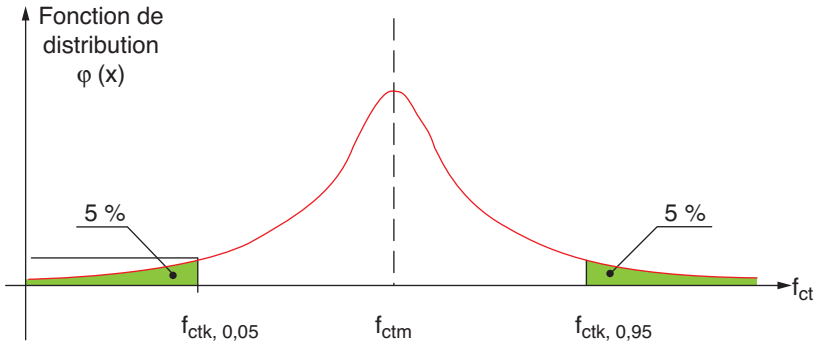
En l'absence de données, la valeur moyenne de la résistance à la traction axiale est donnée par :

$$\boxed{f_{ctm} = 0,3\left[f_{ck}\right]^{2/3}} \text{ (MPa)} \quad \text{pour } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa},$$

$$\boxed{f_{ctm} = 2,12.\text{Log}\left[1 + \frac{f_{cm}}{10}\right]} \text{ (MPa)} \quad \text{pour } f_{ck} > 50 \text{ MPa}$$

16. EC 2 – 3.1.2 (5) & (6)
17. EC 2 – 3.1.2 (5)
18. EC 2 – 3.1.2 (7)P

Les valeurs caractéristiques de la résistance à la traction sont[19] :



$$f_{ctk\ ,\ 0,05} = 0,7.f_{ctm}$$

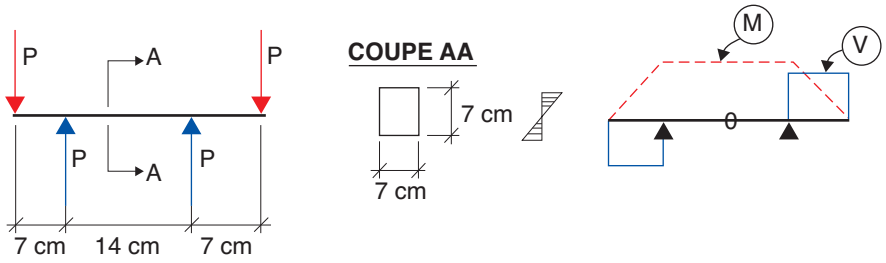
$$f_{ctk\ ,\ 0,95} = 1,3.f_{ctm}$$

La valeur à introduire dans les calculs dépend du type de problème à résoudre :

- f_{ctm} pour calculer les déformations de la structure ;
- $f_{ctk\ ,\ 0,95}$ pour calculer les effets des actions indirectes avant fissuration (par exemple, pourcentage minimal d'armatures) ;
- $f_{ctk,\ 0,05}$ pour calculer la contrainte ultime d'adhérence et le moment de fissuration.

Lorsqu'il est nécessaire de contrôler sur un chantier la valeur de la résistance à la traction f_{ct}, on peut en faire la mesure de manière indirecte :

- soit par essai de flexion pure d'une éprouvette prismatique à base carrée, non armée :



$$f_{ct} = 0,6.f_{ct,\ fl} = 0,6\frac{6.M}{a^3} \quad \text{(m, MNm, MPa)}$$

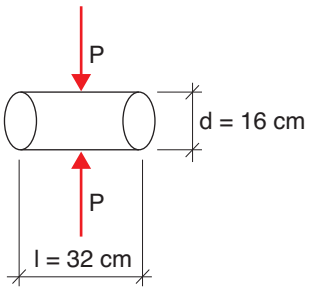
19. EC 2 – 3.1.2 (3)

avec :

a = côté (7 cm = 0,07 m en général),

M = moment de rupture,

- soit par essai de fendage diamétral d'une éprouvette cylindrique (« essai brésilien » ou « splitting »)[20] :



$$f_a = 0{,}9.f_{ct,\,sp} = 0{,}9\,\frac{2.P}{\pi.d.l}\ \text{(m, MN, MPa)}\ \textbf{(3.3)}$$

avec :

d = diamètre de l'éprouvette,

l = longueur de l'éprouvette,

P = charge de rupture.

Les coefficients 0,6 et 0,9 proviennent des comparaisons faites avec des mesures de la résistance par traction directe (délicats à réaliser).

2.2.4 Classes de résistance

Un projet donné doit se référer à une classe de béton correspondant à une valeur spécifiée de la résistance caractéristique à la compression (à 28 jours d'âge[21]).

On distingue quatorze classes de résistances, chacune d'elles étant définie par[22] :

- la résistance caractéristique à la compression mesurée sur cylindre : f_{ck} ;
- la résistance caractéristique à la compression mesurée sur cube : $f_{ck,\,cube}$.

Classe de résistance du béton	C12 /15	C16 /20	C20 /25	C25 /30	C30 /37	C35 /45	C40 /50	C45 /55	C50 /60	C55 /67	C60 /75	C70 /85	C80 /95	C90/ 105
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
$f_{ctk,\ 0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5
$f_{ctk,\ 0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6
ε_{c2} (‰)	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
ε_{cu2} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6
ε_{c3} (‰)	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3
ε_{cu3} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6

20. EC 2 – 3.1.2 (8)
21. EC 2 – 3.1.2 (2)P
22. EC 2 – tableau 3.1

Pour les bâtiments, les classes les plus utilisées correspondent aux colonnes grisées du tableau ci-dessus. La valeur maximale[23] recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française est C90/105.

Pour les ponts, les valeurs extrêmes recommandées sont C30/37 et C70/85[24]. L'Annexe nationale française préconise C20/25 pour C_{min} et C90/105 pour C_{max}.

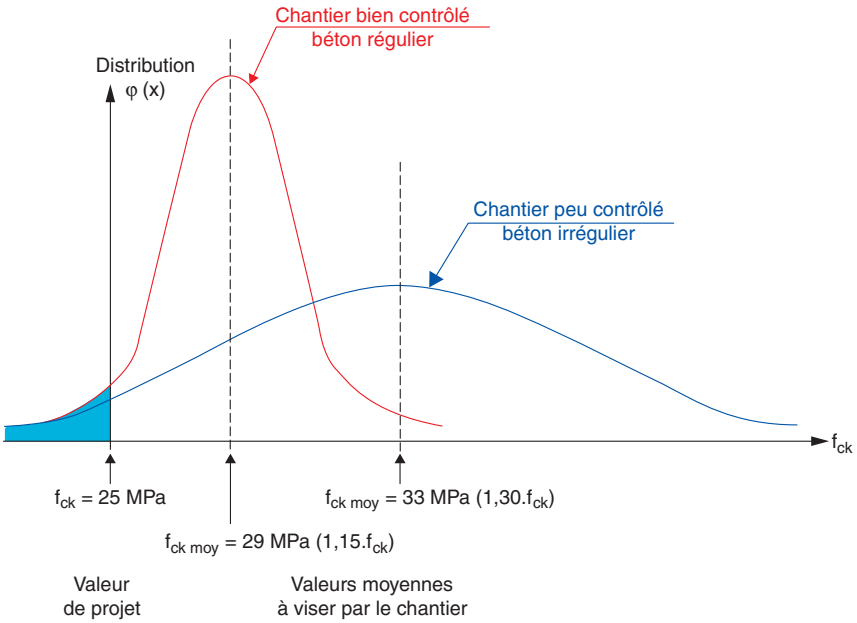
2.2.5 Valeurs à introduire dans les projets

Dans le cas de chantiers courants de bâtiment, pour des bétons à base de CPA–CEM I 42,5 ou de CPJ–CEM II/A 42,5, dosés à 350 kg/m3, on peut prendre en général :

f_{ck} = 25 MPa ou f_{ck} = 30 MPa

f_{ctm} = 2,6 MPa ou f_{ctm} = 2,9 MPa

Le chantier devra viser, en moyenne, une valeur de 15 à 30 % supérieure.



23. EC 2 – voir AN
24. EC 2 – 3.1.2 (102)P

2.3 Déformations du béton – Incidence sur le béton armé

Le béton durci est un pseudo solide en perpétuelle évolution. Ses propriétés sont fonction :

- de son âge ;
- de son histoire ;
- des contraintes qu'il supporte ;
- du milieu ambiant (température et hygrométrie).

Il subit deux types de déformations :
1/ des déformations spontanées en l'absence de toute charge ;
2/ des déformations sous charges :
   – d'abord instantanées, élastiques ou plastiques ;
   – puis lentes sous charges de longue durée.

2.3.1 Déformations spontanées

Elles sont dues :

- aux propriétés des ciments ;
- aux mouvements de l'eau libre contenue dans le béton.

2.3.1.1 Gonflement

Ne s'observe que pour des bétons immergés. Pour une longue durée d'immersion, après stabilisation :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} < 1{,}5.10^{-4}$$

2.3.1.2 Retrait thermique

La prise du ciment est exothermique. Le refroidissement du béton entraîne une diminution des dimensions, généralement négligeable.

2.3.1.3 Retrait hydraulique

Conservé dans un milieu non saturé d'humidité, le béton perd une partie de son eau libre et ses dimensions diminuent. Ce phénomène est appelé retrait.

Si le temps de conservation est suffisamment long, un équilibre s'instaure entre le milieu et l'eau libre et le retrait se stabilise.

2.3.1.3.1 Facteurs dont dépend le retrait

Le retrait augmente quand augmentent :

- le dosage en ciment : C ;
- le rapport eau/ciment : E/C ;
- le temps : t.

Le retrait augmente quand diminuent :

- l'humidité relative du milieu : RH ;
- l'épaisseur des pièces ;
- le pourcentage d'armatures.

2.3.1.3.2 Évaluation des déformations de retrait

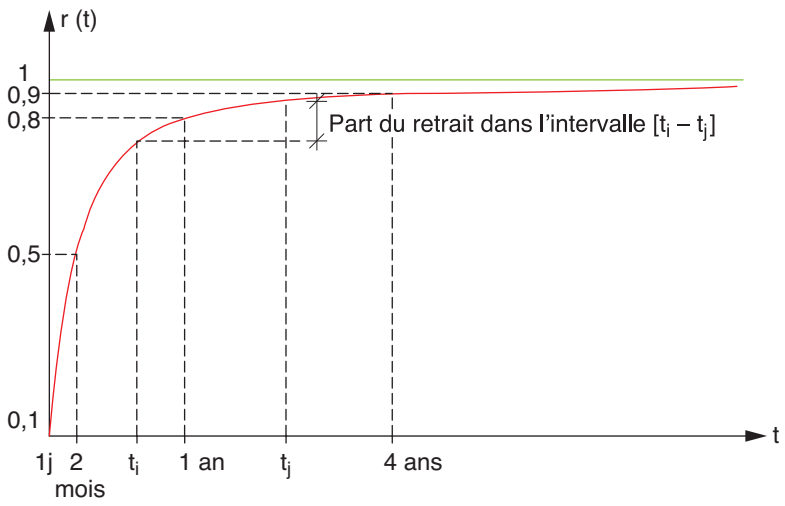
La déformation de retrait peut s'écrire sous la forme :

$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cs,\infty}.r(t)$

avec :

$\varepsilon_{cs,\infty}$ = déformation finale dépendant des facteurs énumérés ci-dessus,

$r(t)$ = loi fonction du temps variant de 0 pour t = 0 à 1 pour t = ∞ .



On désigne par :

A_c = aire de la section de béton,

u = périmètre de cette section exposé à la dessiccation (en contact avec l'extérieur),

$h_0 = \frac{2A_c}{u}$ = rayon moyen de la section transversale.

On peut retenir :

- pour une température moyenne du béton de 20 °C ;
- pour des variations saisonnières de température de – 40 °C à + 40° C[25] ;

- pour une variation d'humidité relative se situant entre 20 % et 100 %[26] ;
- pour des bétons de consistance plastique à l'état frais (classes N et R définies au § 2.2.2)[27],
- les valeurs suivantes pour $\varepsilon_{cs,\infty}$ (‰) et un béton de classe courante C25/30[28] :

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} \qquad \textbf{(3.8)}$$

avec[29] :

- ε_{cd} = déformation due au retrait de dessication (mouvements de l'eau libre, donc lente),
- ε_{ca} = déformation due au retrait endogène (due au durcissement du béton, donc immédiate),

Humidité relative RH (%)	Rayon moyen $h_0 = \frac{2A_c}{u}$ (mm)							
	≤ 100		200		300		≥ 500	
	$\varepsilon_{cd,\infty}$	$\varepsilon_{cs,\infty}$	$\varepsilon_{cd,\infty}$	$\varepsilon_{cs,\infty}$	$\varepsilon_{cd,\infty}$	$\varepsilon_{cs,\infty}$	$\varepsilon_{cd,\infty}$	$\varepsilon_{cs,\infty}$
20	0,59	0,63	0,50	0,54	0,44	0,48	0,41	0,45
40	0,55	0,59	0,47	0,51	0,41	0,45	0,39	0,43
60	0,46	0,50	0,39	0,43	0,35	0,39	0,32	0,36
80	0,29	0,33	0,25	0,29	0,22	0,26	0,20	0,24
90	0,16	0,20	0,14	0,18	0,12	0,16	0,11	0,15
100	0	0,04	0	0,04	0	0,04	0	0,04

Pour diminuer le retrait du béton jeune, on maintient la surface des pièces saturée d'eau en permanence pendant le durcissement :

- paillasses arrosées ;
- projection de résines imperméables.

Cette opération appelée « cure » doit être mise en œuvre immédiatement après coulage du béton.

2.3.1.3.3 Effets du retrait

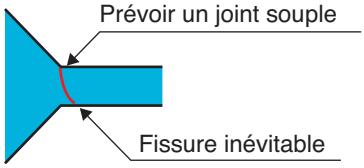
Si l'on maintient à longueur fixe une pièce en béton non armé, tout se passe comme si on exerçait sur celle-ci un effort de traction pour compenser son raccourcissement dû au retrait.

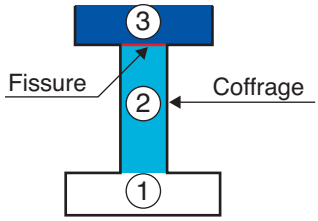
25. EC 2 – 3.1.4 (5)
26. EC 2 – 3.1.4 (6)
27. EC 2 – 3.1.2 (6)
28. EC 2 – 3.1.4 (6)
29. [annexe A1]

Pour un module d'élasticité effectif du béton $E_{c,\ eff} = 10.10^3$ MPa (phénomène lent, voir § 2.3.3.3), la contrainte correspondante vaut pour la déformation finale maximale du retrait $\varepsilon_{cs,\ \infty} = 0{,}63$ ‰ :

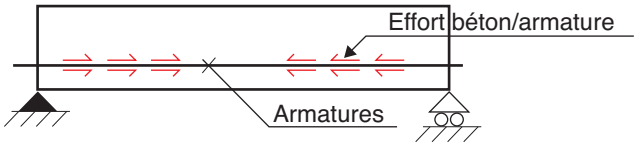
$\sigma_{cs} = E_{c,\ eff}.\varepsilon_{cs} = 10^4.0{,}63.10^{-3} = 6{,}3$ MPa > 2,2 à 2,9 MPa = f_{ctm} (voir § 2.2.4)

Donc, si le retrait est gêné (mauvaise conception des coffrages, pièces coulées en plusieurs phases avec retrait différentiel), des fissures sont inévitables.





Le retrait d'une pièce en béton armé est plus faible que celui de la même pièce non armée. Si elle est librement dilatable, les armatures ont tendance à s'opposer au retrait : elles se mettent en compression, tandis que le béton se met en traction.



Dans un système hyperstatique (ossature), les effets du retrait sont complexes et ne peuvent être évalués par le calcul. Pour les limiter, il faut prendre des précautions d'exécution et prévoir, dans les ouvrages longs, des « joints de dilatation ».

2.3.1.4 Variations de température

Coefficient de dilatation thermique moyen[30] :
$\alpha\theta = 10^{-5}$/°C

En France, on admet une variation annuelle de température de – 40 °C à + 40 °C, c'est-à-dire des dilatations thermiques de $– 4.10^{-4}$ à $+ 4.10^{-4}$ (soit pour une longueur de 100 m = 10^4 cm de – 4 cm à + 4 cm).

La contrainte sans armatures est :
$\sigma_\theta = E_{c,\ eff}.\alpha_\theta.\Delta\theta$

30. EC 2 – 3.1.3 (5)

avec :

$E_{c,eff} = 10^4$ MPa ,

$\boxed{\alpha_\theta = 10^{-5} / °C}$

soit :

$\sigma_\theta = 0{,}10$ MPa/°C.

2.3.2 Déformations instantanées – Courbe expérimentale contraintes-déformations (σ_{bc}-ε_{bc})

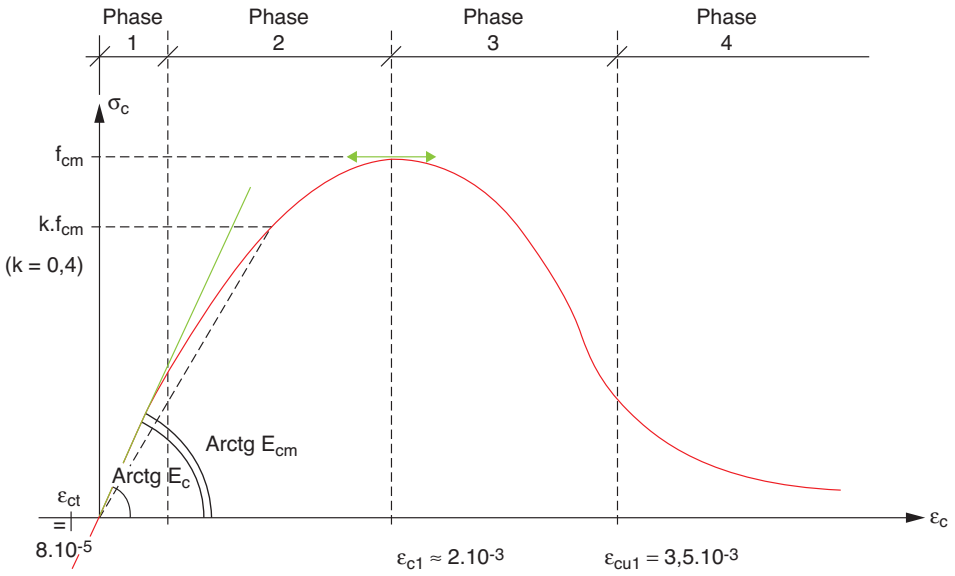
Cette courbe s'obtient par enregistrement au cours d'un essai de compression.

On peut choisir entre :

- une vitesse constante d'accroissement de la contrainte (essai normalisé avec $d\sigma/dt = 0{,}5$ MPa/s) ;
- une vitesse constante d'accroissement de la déformation ($d\varepsilon/dt$ = Cste).

2.3.2.1 Phases de comportement

Dans le deuxième cas, la courbe σ–ε a l'allure suivante[31] :



31. EC 2 – 3.1.5 (2)

Dans la phase 1, le béton se comporte à peu près comme un matériau homogène et élastique, et l'on a :

$$\sigma_c = E_c.\varepsilon_c$$

avec : E_c = module de déformation tangent à l'origine.

Dans la phase 2, une microfissuration due à des tractions transversales se développe, d'où incurvation progressive de la courbe jusqu'à la contrainte f_{cm} atteinte pour une valeur ε_{c1} de la déformation pratiquement indépendante de f_{cm} et sensiblement égale à 2.10^{-3}.

Dans la phase 3, la fissuration longitudinale se généralise et la courbe redescend :

- lentement pour un béton non fragile ;
- rapidement dans le cas contraire.

Dans la phase 4 (sans interêt pratique), le béton se comporte comme un sol tout-venant qui aurait été placé entre les plateaux de la presse hydraulique.

La limite pratique de déformation conventionnellement admise entre les phases 3 et 4 a pour valeur :

$$\varepsilon_{cu1} = 3{,}5.10^{-3}$$

Remarque

En traction, le diagramme ne présente que la phase 1, la rupture se produit pour un allongement :

$\varepsilon_{ct} = 8.10^{-5}$

2.3.2.2 Module « sécant » de déformation instantanée

Pour une contrainte de courte durée d'application (t < 24 h) et au plus égale à $0{,}4.f_{cm}$, on adopte dans les calculs un « module sécant » ou « module de déformation instantanée » égal à[32] :

$$E_{cm} = 22\ 000 \left[\frac{f_{cm}}{10}\right]^{0,3} \text{ (MPa)} \quad (\approx 0{,}95.E_c)\ ^{33}$$

avec :

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa}$$

f_{ck} = résistance caractéristique à la compression du béton à 28 jours.

32. EC 2 – 3.1.3 tableau 3.1
33. EC 2 – 3.1.3 (2)

Remarque

Le module de déformation instantannée dépend de la nature des granulats utilisés dans la fabrication du béton. Il peut être corrigé par le facteur multiplicateur suivant[34] :

- 1 : granulats de quartzite ou de type silico-calcaire,
- 0,9 : granulats calcaires,
- 0,7 : granulats issus de grès,
- 1, 2 : granulats issus de basalte.

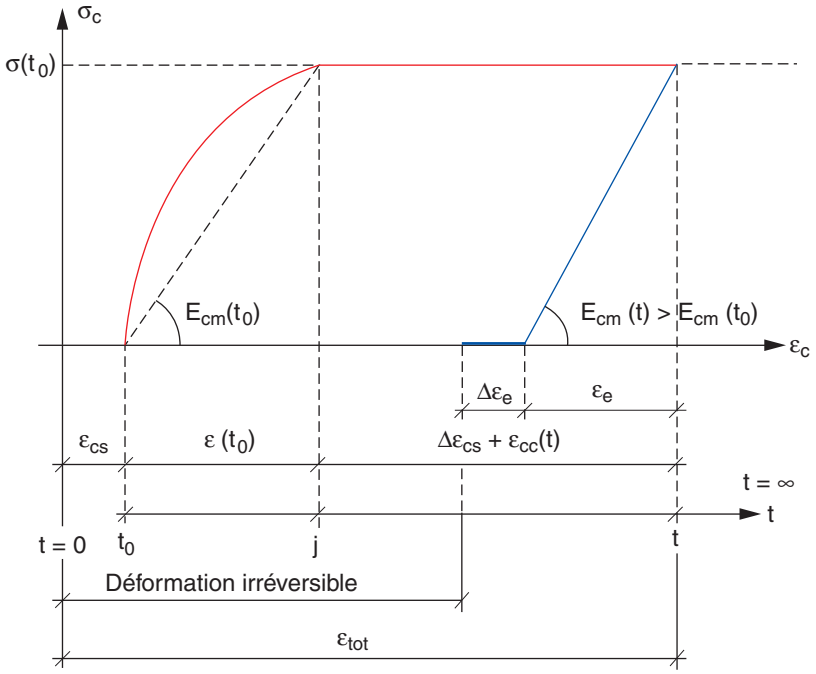
La variation du module d'élasticité en fonction du temps t (en jours) s'écrit :

$$E_{cm}(t) = E_{cm}\left(\frac{f_{cm(t)}}{f_{cm}}\right)^{0,3} \qquad (3.5)$$

2.3.3 Déformations lentes sous charges de longue durée

Le béton longtemps comprimé sous effort constant se raccourcit progressivement : c'est le phénomène du fluage.

2.3.3.1 Essai de chargement-déchargement



34. EC 2 – 3.1.3 (2) + ANF

Soit t (> 0) l'âge en jours, considéré comme temps initial t_0 , où l'on applique à une éprouvette une contrainte de compression constante et permanente ($< 0,45.f_{ck}(t_0)$). L'éprouvette a déjà subi un retrait ε_{cs} . Il s'y ajoute un raccourcissement instantané $\varepsilon(t_0)$ [35].

Les déformations continuent de croître pour se stabiliser (t > 2 ans).

La déformation totale au temps t est :

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{cs} + \varepsilon(t_0) + \Delta\varepsilon_{cs}(t) + \varepsilon_{cc}(t) \qquad \textbf{(1)}$$

avec :

$\Delta\varepsilon_{cs}(t)$ = accroissement de retrait entre t et t_0 jours mesuré sur une éprouvette témoin de même béton non chargée :

$$\Delta\varepsilon_{cs}(t) = \varepsilon_{cs,\infty}\left[r(t) - r(t_0)\right]$$

$\varepsilon_{cc}(t)$ = fluage.

Lors du déchargement, au temps *t*, il se produit une déformation élastique instantanée réversible :

ε_e ($< \varepsilon(t_0)$) .

Au repos, la déformation diminue de :

$\Delta\varepsilon_e$ = élasticité différée

et se stabilise.

La déformation finale obtenue est irréversible et elle vaut :

$$\varepsilon_{tot}(t,\ t_0) = \varepsilon_{tot} - (\varepsilon_e + \Delta\varepsilon_e)$$

Cet essai montre que le fluage et le retrait sont des phénomènes indissociables.

2.3.3.2 Facteurs dont dépend le fluage

Le fluage augmente quand augmentent :

- la contrainte ;
- le dosage en ciment : C ;
- le rapport eau/ciment : E/C ;
- le temps : t.
- Le fluage augmente quand diminuent :
- la maturité du béton à l'âge de la mise en charge ;
- l'épaisseur des pièces ;
- l'hygrométrie.

35. EC 2 – 3.1.4 (2)

2.3.3.3 Évaluation des déformations de fluage[36]

En première approximation, on peut admettre que ε_{cc} est proportionnel à $\varepsilon(t_0)$, c'est-à-dire à $\sigma(t_0)$ (fluage linéaire). Avec cette hypothèse, au temps t, pour $\sigma(t_0) = \text{Cste}$, on a :

$$\varepsilon_{cc}(t) = \varphi(t,\ t_0).\varepsilon(t_0).r(t) = \varphi(t,\ t_0)\frac{\sigma(t_0)}{E_{cm}(t_0)}r(t)$$

avec :

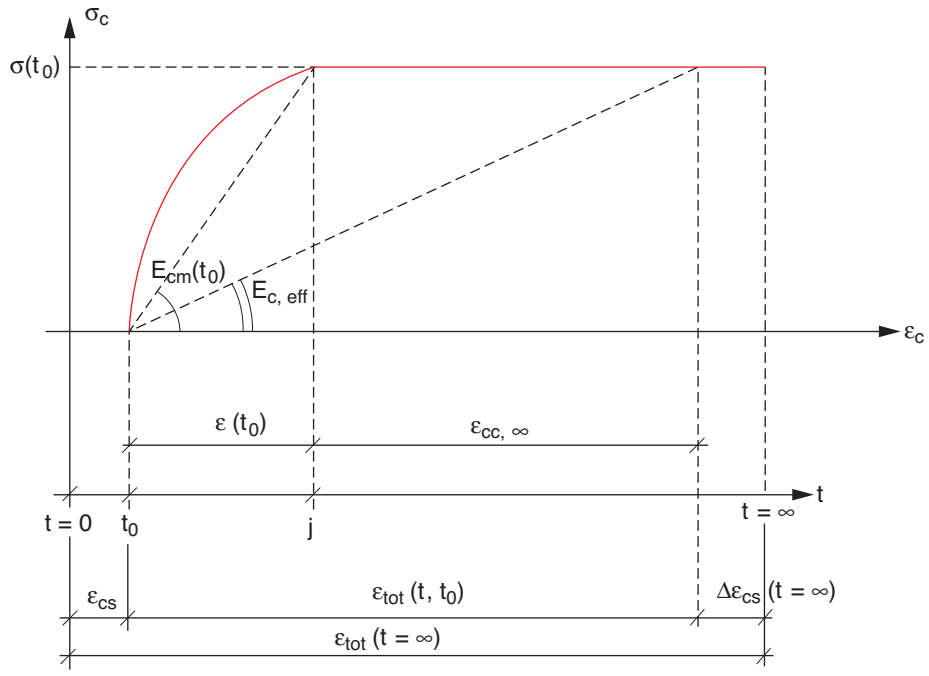
$\varphi(t,\ t_0)$ = coefficient de fluage,

t_0 = âge de la première mise en charge,

$E_{cm}(t_0)$ = module de déformation instantanée du béton à t_0 jours,

r(t) = loi fonction du temps déjà vue pour le retrait.

$$t \to \infty \quad \Rightarrow \quad r(t) = 1 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{cc,\,\infty} = \varphi(\infty,\ t_0)\frac{\sigma(t_0)}{E_{cm}(t_0)} = \varphi(\infty,\ t_0).\varepsilon(t_0)$$



36. EC 2 – 3.1.4 (3)

Le raccourcissement total hors retrait vaut :

$$\varepsilon_{tot}(t,\ t_0) = \varepsilon_{tot}(t=\infty) - \left[\varepsilon_{cs} + \Delta\varepsilon_{cs}(t=\infty)\right] = \varepsilon(t_0) + \varepsilon_{cc,\ \infty} = \left[1 + \varphi\left(\infty,\ t_0\right)\right]\varepsilon(t_0)$$

d'où en divisant par $\sigma(t_0)$ puisque $\sigma = -E.\varepsilon$:

$$\frac{1}{E_{c,\ eff}} = \frac{1 + \varphi\left(\infty,\ t_0\right)}{E_{cm}(t_0)}$$

Le « module d'élasticité effectif tangent du béton » vaut donc[37] :

$$\boxed{E_{c,\ eff} = \frac{E_{cm}(t_0)}{1 + \varphi\left(\infty,\ t_0\right)}}\ \text{(MPa)} \qquad \textbf{(7.20)}$$

$E_{c,\ eff}$ est souvent de l'ordre de 10.10^3 MPa, mais il peut s'abaisser à 7.10^3 MPa.

Pour t = 28 jours, $E_{cm}\left(t_0\right) = E_{cm}$

On peut retenir :E_{cm} = 30 000 à 37 000 MPa.

2.3.3.4 Évaluation du coefficient de fluage[38]

Hypothèses :

- températures ambiantes comprises entre – 40 °C et + 40 °C ;
- humidité relative RH comprise entre 40 % et 100 % ;
- contrainte de compression du béton à l'âge t_0 du chargement inférieure à $0,45.f_{ck}\left(t_0\right)$.

Données d'entrée dans les abaques :

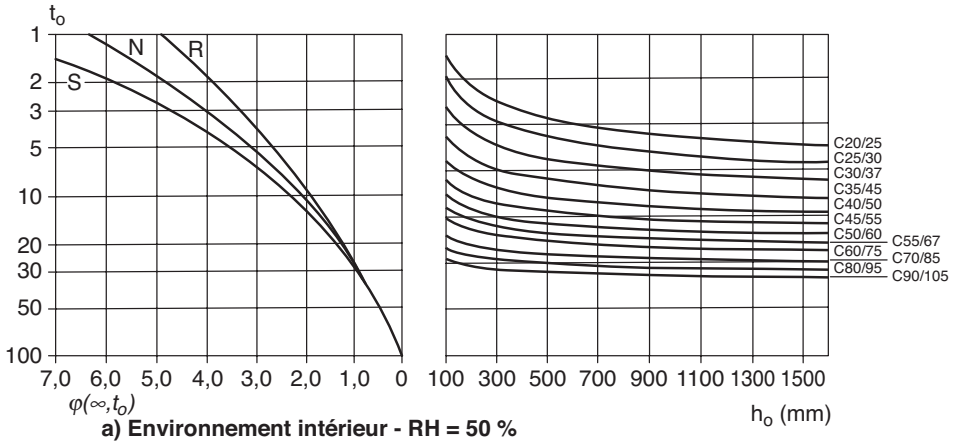
- classe du béton considéré (C20/25 à C90/105) ;
- RH = humidité relative de l'environnement (50 % intérieurs, 80 % extérieurs) ;
- t_0 = âge du béton au moment du chargement (en jours) ;
- classes du ciment utilisé :
  - S : ciment à durcissement lent ;
  - N : ciment à durcissement normal ;
  - R : ciment à durcissement rapide ;
  - $h_0 = \frac{2.A_c}{u}$ = rayon moyen de l'élément

  avec :
  - A_c = aire de la section transversale du béton,
  - u = périmètre de la partie exposée à la dessiccation.

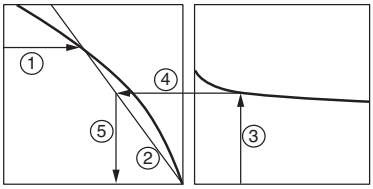
37. EC 2 – 7.4.3 (5)
38. EC 2 – 3.1.4 (5)

Résultat fourni par les abaques :
$\varphi(\infty,\ t_0)$ = coefficient de fluage.

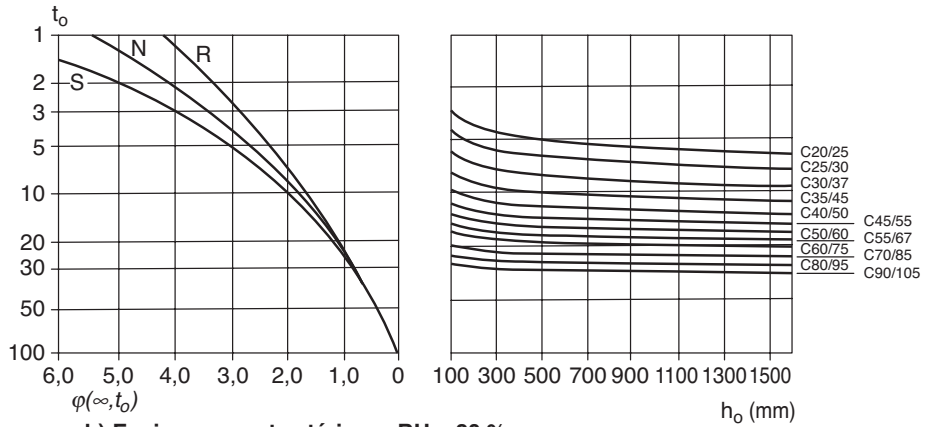
Méthode de détermination du cofficient de fluage $\varphi(\infty, t_0)$ pour le béton dans des conditions d'environnement normales.



a) Environnement intérieur - RH = 50 %



Note :
- le point d'intersection des droites 4 et 5 peut également se situer au-dessus du point 1
- pour $t_o > 100$, il est suffisamment précis de supposer $t_o = 100$ (et d'utiliser la tangente)



b) Environnement extérieur - RH = 80 %

Lorsque la contrainte de compression du béton à t_0 jours dépasse $0,45.f_{ck}(t_0)$, pour tenir compte de la non linéarité du fluage du béton, on remplace $\varphi(\infty,\ t_0)$ par[39] :

$$\varphi_k(\infty,\ t_0) = \varphi(\infty,\ t_0).e^{1,5(k_\sigma - 0,45)} \qquad \textbf{(3.7)}$$

où :

$$k_\sigma = \frac{\sigma_c}{f_{cm}(t_0)}$$

avec, à la date du chargement :

σ_c = contrainte de compression du béton,

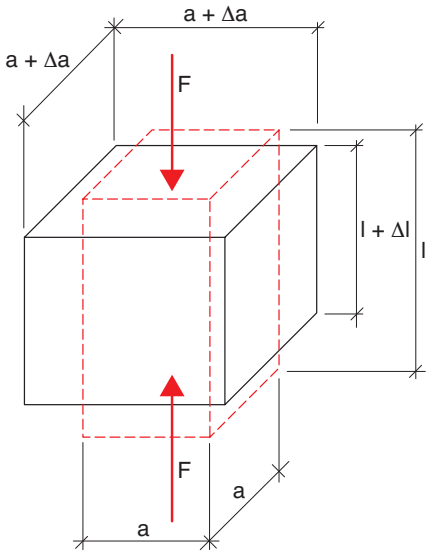
$f_{cm}(t_0)$ = résistance moyenne en compression du béton calculée suivant les indications du § 2.2.2.

Dans le cas où les hypothèses faites ci-dessus ne sont pas vérifiées, l'annexe B des Règles EC 2 permet un calcul plus précis de $\varphi(\infty, t_0)$.[40]

2.3.4 Déformations transversales – Coefficient de Poisson

Le coefficient de poisson est le rapport entre la déformation transversale relative et la déformation longitudinale relative :

$$\nu = \frac{\frac{\Delta a}{a}}{\frac{\Delta l}{l}}$$



En béton armé, ce coefficient intervient surtout dans le calcul des dalles où il prend les valeurs[41] :

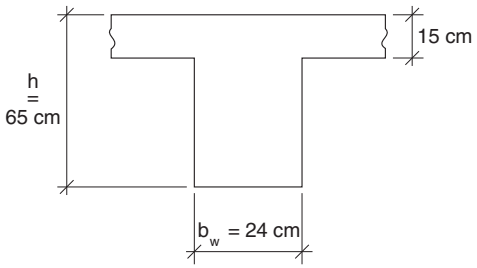
$$\nu = \begin{cases} 0,20 & \text{pour le calcul des déformations (béton non fissuré),} \\ 0 & \text{pour le calcul des sollicitations (béton fissuré).} \end{cases}$$

39. EC 2 – 3.1.4 (4)
40. EC 2 – 3.1.4 (2)
41. EC 2 – 3.1.3 (4)

II. APPLICATION

Détermination du coefficient de fluage et des modules d'élasticité du béton

–Énoncé–



On considère la poutre dont la section droite est figurée ci-contre. La retombée seule est exposée à la dessiccation.

Humidité relative : RH = 80 % (environnement extérieur).

Béton C25/30 à base de ciment à durcissement normal (classe N).

Âge de mise en charge de la poutre : t_0 = 28 jours.

On se propose de déterminer :

1/ le coefficient de fluage ;

2/ le module d'élasticité effectif.

–Corrigé–

1. Rayon moyen de l'élément

A_c = aire de la section transversale du béton $A_c = 24.65 = 1\ 560\ cm^2$

u = périmètre de la partie exposée à la dessiccation

$u = 24 + 2.(65 - 15) = 124$ cm

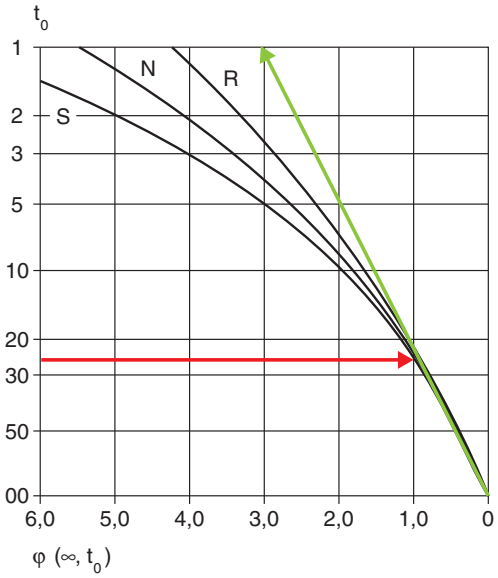
$$h_0 = \frac{2.A_c}{u} \qquad h_0 = \frac{2.1\ 560}{124} = 25\ cm = 250\ mm$$

2. Coefficient de fluage

2.1 Étapes 1 et 2 : détermination de la sécante sur l'abaque de gauche

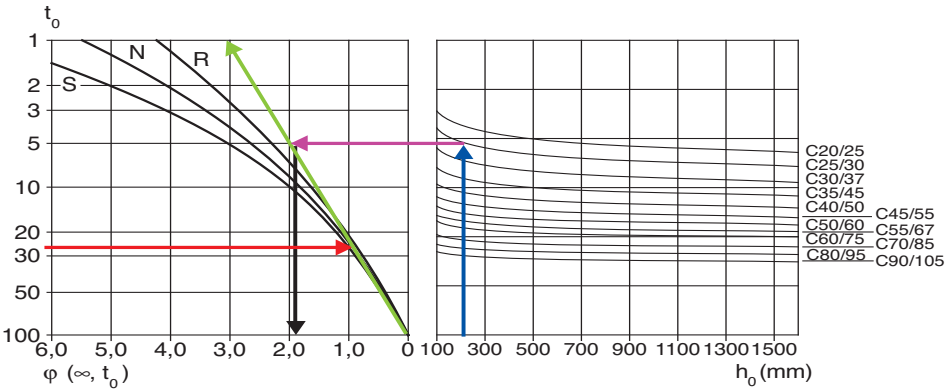
t_0 = 28 jours
RH = 80 %
Ciment de classe N
$\Rightarrow$ utilisation du couple d'abaques inférieurs (voir § 2.3.3.4 des rappels théoriques).

Sur l'abaque ci-dessous :
- l'étape 1 est représentée par une flèche rouge ;
- l'étape 2 est représentée par une flèche verte.



2.2 Étapes 3, 4 et 5 : détermination du coefficient de fluage

Sur l'abaque ci-dessous :
- l'étape 3 est représentée par une flèche bleue ;
- l'étape 4 est représentée par une flèche rose ;
- l'étape 5 est représentée par une flèche noire.



b) Environnement extérieur - RH = 80%

Le coefficient de fluage vaut donc : $\varphi(\infty,\ t_0) = 1{,}9$

3. Module d'élasticité effectif tangent du béton

Module de déformation instantanée :

Pour $t_0 = 28$ jours :

$f_{cm} = f_{ck} + 8$ MPa $\qquad f_{cm} = 25 + 8 = 33$ MPa

$$E_{cm}(t_0) = E_{cm} = 22\ 000 \left[\frac{f_{cm}}{10}\right]^{0,3} \text{ (MPa)} \qquad E_{cm}(t_0) = 22\ 000 \left[\frac{33}{10}\right]^{0,3}$$

$$E_{cm}(t_0) = 31\ 476 \text{ MPa}$$

Module d'élasticité effectif tangent du béton :

$$E_{c,\ eff} = \frac{E_{cm}(t_0)}{1 + \varphi\left(\infty,\ t_{(0)}\right)} \qquad E_{c,\ eff} = \frac{31\ 476}{1 + 1{,}9} = 10\ 854 \text{ MPa}$$

Remarque

– pour le module d'élasticité effectif tangent du béton :

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{c,\ eff}} \qquad \alpha_e = \frac{200\ 000}{10\ 854} = 18{,}43$$

– pour le module d'élasticité instantanée :

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}} \qquad \alpha_e = \frac{200\ 000}{31\ 476} = 6{,}35$$

3 Béton armé – Généralités

I. RAPPELS THÉORIQUES

1. Actions et sollicitations

1.1 Terminologie

Actions = forces et/ou couples appliqués à une construction :

- soit directement :
  - charges permanentes ;
  - charges d'exploitation ;
  - charges climatiques ;
  - etc.
- soit indirectement (résultant de déformations imposées) :
  - retrait ;
  - fluage ;
  - variations de température ;
  - tassements ;
  - etc.

Sollicitations = éléments de réduction de la résistance des matériaux :

- N = effort normal ;
- M = moment fléchissant ;
- V = effort tranchant ;
- T = couple de torsion.

1.2 Actions

On distingue les trois catégories d'actions ci-après[1].

1/ Les actions permanentes G dont l'intensité est constante ou très peu variable dans le temps :

- Poids propre :
  $G_0 = \varpi.v_0$
  avec :

1. EC 2 – 2.3.1

ϖ = 25 kN/m^3 = poids volumique du béton armé,
v_0 = volume théorique de la pièce en m^3.

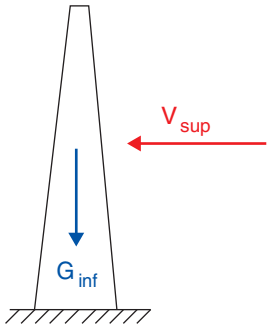
- Poids des équipements fixes :
  - revêtements ;
  - cloisons ;
  - etc.
- Forces dues aux déformations imposées :
  - retrait ;
  - fluage ;
  - tassements, mouvements différentiels des structures[2] ;
  - etc.

Si les écarts d'une action permanente par rapport à sa valeur moyenne peuvent être importants, il faut prendre, selon le cas, la valeur la plus défavorable :

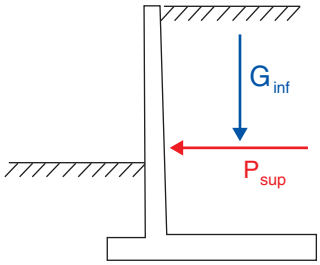
- maximale : G_{sup} ;
- ou minimale : G_{inf} .

Par exemple :

- pour une cheminée, le poids minimal est à combiner avec le vent maximal ;

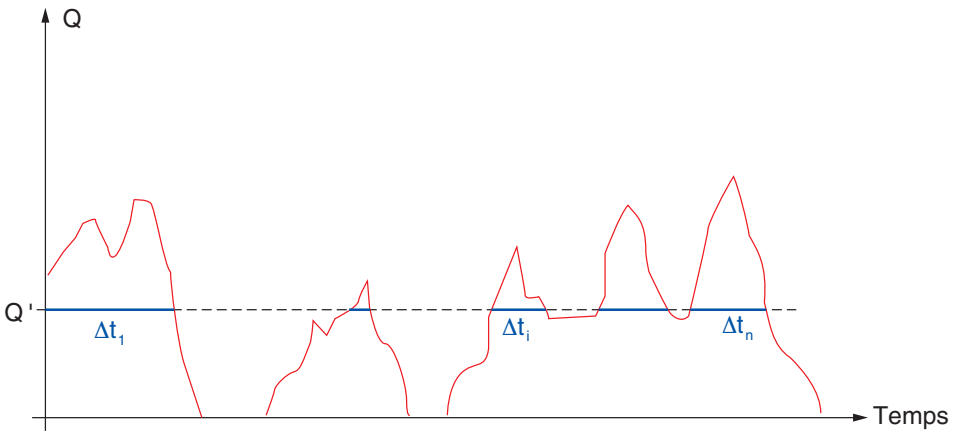


- pour un mur de soutènement, la poussée des terres maximale est à combiner avec le poids minimal du remblai.

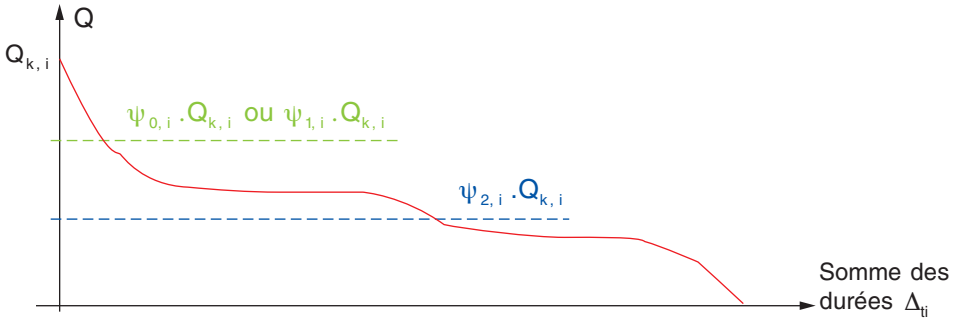


2. EC 2 – 2.3.1.3 (1)

2/ Les actions variables Q dont l'intensité varie fréquemment et de façon importante dans le temps selon une loi tout à fait quelconque :



On fait le cumul des intervalles de temps Δt_1, …, Δt_i, …, Δt_n pendant lesquels un niveau quelconque Q' a été atteint ou dépassé.



En fixant alors certains niveaux de manière conventionnelle, on définit pour une même action variable plusieurs valeurs représentatives, à considérer en fonction de la combinaison d'actions dans laquelle elle intervient[3] :

$Q_{k,\,i}$ = valeur caractéristique (indice k pour caractéristique, indice i pour rang) ;

$\psi_{0,\,i}.Q_{k,\,i}$ = valeur de combinaison ;

$\psi_{1,\,i}.Q_{k,\,i}$ = valeur fréquente ;

$\psi_{2,\,i}.Q_{k,\,i}$= valeur quasi permanente.

3. EN 1990

Les coefficients $\psi_{0,\,i} \geq \psi_{1,\,i} \geq \psi_{2,\,i}$ sont fixés par les annexes :

- A1 de la norme EN 1990 (EC 0) pour les bâtiments[4] ;
- A2 de la norme EN 1990 (EC 0) pour les ponts[5].

La valeur nominale $Q_{k,\,i}$ est fixée par les textes réglementaires suivants[6] :

- Bâtiments :
  - charges d'exploitation : norme EN 1991 (EC 1), partie 1.1 ;
  - charges climatiques :
    - vent : norme EN 1991 (EC 1), partie 1.4
    - neige : norme EN 1991 (EC 1), partie 1.3.
- Ponts :
  - charges d'exploitation : norme EN 1991 (EC 1), partie 2 ;
  - charges climatiques : norme EN 1991 (EC 1), partie 1.4.

3/ Les actions accidentelles *A* proviennent de phénomènes rares :

- chocs de bateaux ou de véhicules sur les appuis des ouvrages d'art : norme EN 1991 (EC 1), partie 2[7] ;
- séismes : norme EN 1998 (EC 8)[8].

1.3 Combinaisons d'actions

1.3.1 Généralités

Une construction pouvant être soumise à un grand nombre de combinaisons d'actions complexes et variées, on est amené à faire un choix, en s'efforçant de couvrir avec une forte probabilité les circonstances les plus défavorables qui pourront se présenter au cours de sa vie.

D'où deux étapes :

1/ Établissement des différentes combinaisons d'actions.

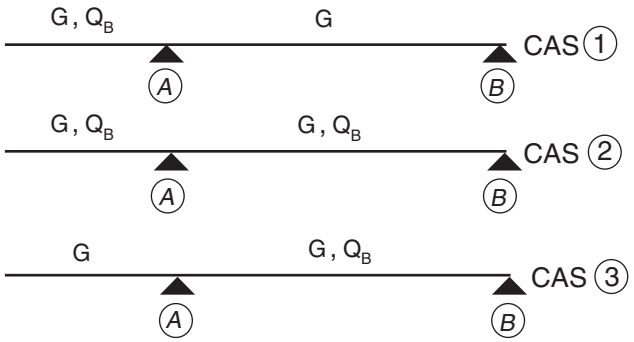
2/ Pour chaque combinaison, recherche de la disposition de chargement la plus défavorable vis-à-vis de l'état limite envisagé et de la sollicitation étudiée :
   - soit pour l'ensemble de la pièce ;
   - soit pour la section considérée.

Combinaison d'action et disposition de chargement constituent donc deux notions distinctes à ne pas confondre.

---

4. EN 1990 – annexe A1
5. EN 1990 – annexe A2
6. EN 1991
7. EN 1991
8. EN 1998

Par exemple, pour une poutre-console, la combinaison avec G et Q_B conduit à trois dispositions de chargement :



donne M^A_{max} et M^t_{min}

donne M^A_{max}

donne M^t_{max}

1.3.2 Notations

On pose[9] :

$Q_{k,\,1}$ = valeur caractéristique de l'action variable « dominante » (successivement chaque action variable) ;

$G_{kj,\,sup}$ = valeur caractéristique de l'action permanente défavorable (effet de même sens que celui de l'action variable dominante) ;

$G_{kj,\,inf}$ = valeur caractéristique de l'action permanente favorable (effet de sens contraire à celui de l'action variable dominante) ;

$Q_{k,\,i}$ = valeur caractéristique des actions variables « d'accompagnement » ($i > 1$).

1.3.3 Sollicitations de calcul vis-à-vis des états limites ultimes

On distingue :

1.3.3.1 Combinaisons d'actions en situation durable ou transitoire[10]

Formulation :

$$\sum_j \gamma_{Gj,\,sup} . G_{kj,\,sup} + \sum_j \gamma_{Gj,\,inf} . G_{kj,\,inf} + \gamma_{Q,\,1} . Q_{k,\,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,\,i} . \psi_{0,\,i} . Q_{k,\,i} \quad \textbf{(6.10)}$$

avec :

$G_{kj,\,sup}$ et $G_{kj,\,inf}$ = actions permanentes d'origines différentes,

9. EN 1990
10. EN 1990 – annexe A1 – 6.4.3.2

$\gamma_{Gj} = \gamma_{Gj,\,sup}$ ou $\gamma_{Gj,\,inf}$ et $\gamma_{Q,\,i}$ coefficients de sécurité donnés par le tableau suivant :

	Actions permanentes (γ_{Gj})	Actions variables ($\gamma_{q,\,i}$)	
		Dominante avec sa valeur caractéristique	Accompagnement avec leur valeur de combinaison
Effet favorable	$\gamma_{Gj,\,inf} = 1,00$		
Effet défavorable	$\gamma_{Gj,\,sup} = 1,35$	1,5	1,5

Par simplification, pour les bâtiments, les combinaisons d'actions à considérer sont les suivantes :

- lorsque l'on ne considère que l'action variable la plus défavorable :

$$\sum_j 1,35.G_{kj,\,sup} + \sum_j G_{kj,\,inf} + 1,5.Q_{k,\,1}$$

- lorsque l'on considère toutes les actions variables :

$$\sum_j 1,35.G_{kj,\,sup} + \sum_j G_{kj,\,inf} + 1,5.Q_{k,\,1} + \sum_{i>1} 1,5.\psi_{0,\,i}.Q_{k,\,i}$$

1.3.3.2 Combinaisons accidentelles[11]

Ces combinaisons font intervenir les actions accidentelles.

Formulation :

- pour les situations de projet accidentelles :

$$\sum_j G_{k,\,j} + A_d + \begin{cases} \psi_{1,\,1} \\ \text{ou} \\ \psi_{2,\,1} \end{cases} .Q_{k,\,1} + \sum_{i>1} \psi_{2,\,i}.Q_{k,\,i} \qquad \textbf{(6.11b)}$$

- pour les situations de projet sismiques :

$$\sum_j G_{k,\,j} + A_{Ed} + \sum_{i\geq 1} \psi_{2,\,i}.Q_{k,\,i} \qquad \textbf{(6.12b)}$$

- avec :
  - A_d = valeur représentative de l'action accidentelle,
  - A_{Ed} = valeur représentative de l'action sismique,
  - $G_{k,\,j} = G_{kj,\,sup}$ ou $G_{kj,\,inf}$ = actions permanentes d'origines différentes,
  - $\psi_{1,\,1}.Q_{k,\,1}$ = valeur fréquente de l'action variable dominante,
  - $\psi_{2,\,i}.Q_{k,\,i}$ = valeur quasi permanente des actions variables dominante ou d'accompagnement.

11. EN 1990 – annexe A1

Dans ce cas, les coefficients de sécurité sur les matériaux sont réduits et pris égaux à[12] :

- $\gamma_s = 1$ pour les aciers ;
- $\gamma_c = 1,2$ pour le béton.

1.3.4 Sollicitations de calcul vis-à-vis des états limites de service

Combinaison caractéristique[13] :

$$\sum_j G_{k,\,j} + Q_{k,\,1} + \sum_{i>1} \psi_{0,\,i} . Q_{k,\,i} \qquad \textbf{(6.14b)}$$

Combinaison fréquente :

$$\sum_j G_{k,\,j} + \psi_{1,\,1} . Q_{k,\,1} + \sum_{i>1} \psi_{2,\,i} . Q_{k,\,i} \qquad \textbf{(6.15b)}$$

Combinaison quasi permanente :

$$\sum_j G_{k,\,j} + \sum_{i\geq 1} \psi_{2,\,i} . Q_{k,\,i} \qquad \textbf{(6.16b)}$$

Par simplification, pour les bâtiments, la combinaison d'action caractéristique peut s'écrire :

- lorsque l'on ne considère que l'action variable la plus défavorable :

$$\sum_j G_{k,\,j} + Q_{k,\,1}$$

- lorsque l'on considère toutes les actions variables :

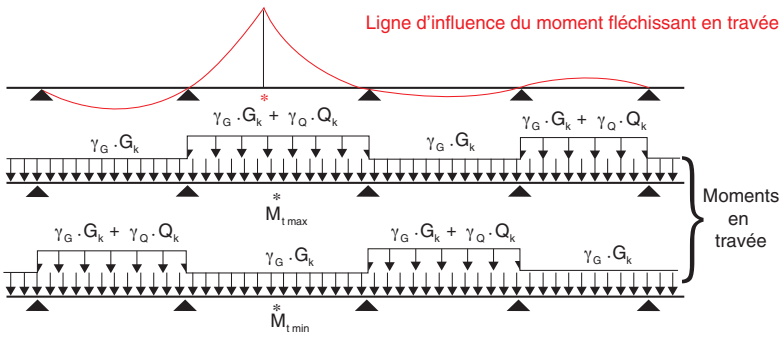
$$\sum_j G_{k,\,j} + \sum_{i\geq 1} \psi_{0,\,i} . Q_{k,\,i}$$

1.3.5 Simplifications pour les dispositions de chargement pour les bâtiments

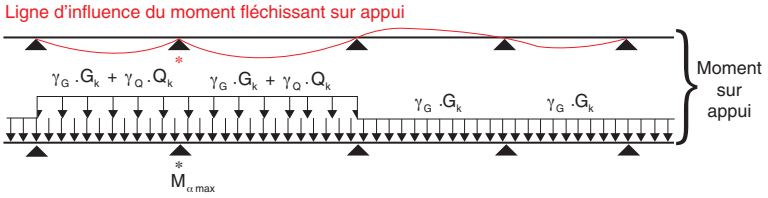
Lorsque l'Annexe nationale le prévoit, on peut simplifier les dispositions de chargement permettant de déterminer les effets extrêmes (M, V, R) en considérant les deux cas suivants[14] :

12. EC 2 – 2.4.2.4 (1)
13. EN 1990 – 6.5.3
14. EC 2 – 5.1.3 (1)P +ANF

- cas ① : chargement alterné d'une travée sur deux :



- Cas ② : chargement de deux travées consécutives, les autres étant non chargées :

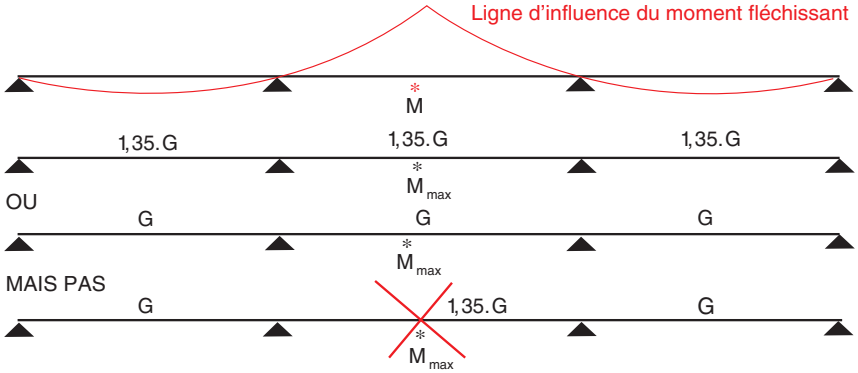


Ce dernier cas permet également de calculer les efforts tranchants et les réactions d'appuis extrêmes.

1.3.6 Remarques importantes

3/ Une même action permanente n'est jamais partagée en deux parties. En particulier, le poids propre d'une poutre continue est introduit[15] :
- d'une part, avec la même valeur (G_{sup} ou G_{inf}) ;
- d'autre part, avec le même coefficient ($\gamma_{Gj,\,sup}$ = 1,35 ou $\gamma_{Gj,\,inf}$ = 1), sur toute la longueur de cette poutre.

15. EC 2 – 2.4.3 (2)



4/ Les actions variables doivent être considérées les unes après les autres comme action variable « dominante » et venir successivement en occuper le rang. Elles sont toujours introduites de la manière la plus défavorable :
   – soit avec leur valeur de combinaison ;
   – soit avec leur valeur minimale qui est toujours nulle (absence d'action).

2. Hypothèses et données pour le calcul du béton armé

2.1 Introduction

On conserve les hypothèses générales utilisées en résistance des matériaux dans la théorie des poutres :

- dimensions transversales constantes (ou très lentement variables) ;
- dimensions transversales faibles par rapport à la longueur de la poutre ;
- ligne moyenne rectiligne (ou à grand rayon de courbure).

On distingue deux états limites pour le dimensionnement (armatures et béton) :

- des états limites ultimes (ELU) :
  – de résistance ;
  – de stabilité de forme ;
  – d'équilibre statique ;
  – de fatigue ;
- des états limites de service (ELS) atteints par :
  – dépassement des contraintes-limites en service ;
  – fissuration ;
  – déformation ;
  – vibration.

Les exigences vis-à-vis de la fissuration se réfèrent aux six classes d'exposition définies ci-dessous en fonction de l'environnement[16] :

Désignation de la classe	Description de l'environnement	Exemples informatifs illustrant le choix des classes d'exposition
1. Aucun risque de corrosion ni d'attaque		
X0	Béton non armé et sans pièces métalliques noyées : toutes expositions sauf en cas de gel/dégel, d'abrasion et d'attaque chimique. Béton armé ou avec des pièces métalliques noyées : très sec.	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est très faible.
2. Corrosion induite par carbonatation		
XC1	Sec ou humide en permanence.	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est faible. Béton submergé en permanence dans de l'eau.
XC2	Humide, rarement sec.	Surfaces de béton soumises au contact à long terme de l'eau. Un grand nombre de fondations.
XC3	Humidité modérée.	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est moyen ou élevé. Béton extérieur abrité de la pluie. Surfaces de béton protégées par une étanchéité (ponts)[1)].
XC4	Alternativement humide et sec.	Surfaces de béton soumises au contact de l'eau, mais n'entrant pas dans la classe d'exposition XC2.
3. Corrosion induite par les chlorures		
XD1	Humidité modérée.	Surfaces de béton exposées à des chlorures transportés par voie aérienne.
XD2	Humide, rarement sec.	Piscines. Éléments en béton exposés à des eaux industrielles contenant des chlorures.
XD3	Alternativement humide et sec.	Éléments de ponts exposés à des projections contenant des chlorures. Chaussées. Dalles de parcs de stationnement de véhicules.
4. Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer		
XS1	Exposé à l'air véhiculant du sel marin mais pas en contact direct avec l'eau de mer.	Structures sur ou à proximité d'une côte.
XS2	Immergé en permanence.	Éléments de structures marines.
XS3	Zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns.	Éléments de structures marines.

16. EC 2 – 4.2 (2)

5 Attaque gel/dégel		
XF1	Saturation modérée en eau, sans agent de déverglaçage.	Surfaces verticales de béton exposées à la pluie et au gel.
XF2	Saturation modérée en eau, avec agents de déverglaçage.	Surfaces verticales de béton des ouvrages routiers exposés au gel et à l'air véhiculant des agents de déverglaçage[2)].
XF3	Forte saturation en eau, sans agents de déverglaçage.	Surfaces horizontales de béton exposées à la pluie et au gel.
XF4	Forte saturation en eau, avec agents de déverglaçage ou eau de mer.	Routes et tabliers de pont exposés aux agents de déverglaçage[3)]. Surfaces de béton verticales directement exposées aux projections d'agents de déverglaçage et au gel. Zones des structures marines soumises aux projections et exposées au gel.
6. Attaques chimiques		
XA1	Environnement à faible agressivité chimique selon l'EN 206-1, tableau 2.	Sols naturels et eau dans le sol.
XA2	Environnement d'agressivité chimique modérée selon l'EN 206-1, tableau 2.	Sols naturels et eau dans le sol.
XA3	Environnement à forte agressivité chimique selon l'EN 206-1, tableau 2.	Sols naturels et eau dans le sol.

1) EC 2 – 4.2 (105) note + Annexe nationale
2) Toutes les surfaces en béton exposées :
– situées à x (m) de la chaussée dans le sens horizontal
– ou situées à y (m) au dessus de la chaussée,
– ou supérieures des appuis situées sous les joints de dilatation,
sont considérées comme directement soumises aux sels de déverglaçage, avec comme valeurs recommandées de ces distances : x = y = 6,00 m. (EC 2 – 4.2 (106))
3) Voir note ci-dessus.

2.2 Hypothèses générales valables pour tous les états limites

H_1) Au cours de la déformation, les sections droites restent planes et conservent leurs dimensions (principe de Navier-Bernouilli[17]).

H_2) Par adhérence, les allongements relatifs de l'acier et du béton au contact sont les mêmes.

17. EC 2 – 6.1 (2)P

2.3 Hypothèses supplémentaires pour les états limites de service (ELS)

2.3.1 Hypothèses supplémentaires

H_3) La résistance du béton tendu est négligée dès lors que la contrainte de traction en flexion est au moins égale à[18] :

$$f_{ct,\ eff} = \begin{cases} f_{ctm} : \text{si la maîtrise de la fissuration est requise,} \\ f_{ctm,\ fl} = \text{Max} \begin{cases} \left(1,6 - \dfrac{h}{1\,000}\right) f_{ctm} \\ f_{ctm} \end{cases} : \text{dans les autres cas,} \end{cases} \quad \textbf{(3.23)}$$

avec h = hauteur de l'élément en mm.

H_4) En vertu de la loi de Hooke, les contraintes sont proportionnelles aux déplacements :

$$\sigma = -E.\varepsilon = -E\frac{\Delta l}{l}$$

2.3.2 Sections homogènes et sections homogènes réduites

2.3.2.1 Introduction

D'après l'hypothèse H_2, en un point où acier et béton sont au contact :

$$\varepsilon_s = \varepsilon_c$$

D'où, d'après l'hypothèse H_4 :

$$\frac{\sigma_s}{E_s} = \frac{\sigma_c}{E_{c,\ eff}}$$

On en déduit :

$$\sigma_s = \frac{E_s}{E_{c,\ eff}}\sigma_c = \alpha_e.\sigma_c$$

en posant :

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{c,\ eff}}$$

18. EC 2 – 7.1 (2) + 3.1.8 (1)

L'effort dans l'acier (section A_s) vaut donc :

$A_s.\sigma_s = A_s(\alpha_e.\sigma_c) = (\alpha_e.A_s)\sigma_c$

2.3.2.2 Sections homogènes et sections homogènes réduites

Toute aire A_s d'acier peut être remplacée par une aire de béton fictive équivalente $\alpha_e.A_s$ ayant même centre de gravité.

Les sections réelles (aire totale de béton A_c + aire totale d'acier A_s) peuvent être remplacées par des sections homogènes ou des sections homogènes réduites suivant que l'on tient compte ou non du béton tendu :

$$\underbrace{\underbrace{A_c + \alpha_e.A_s}_{\text{section homogène}} - A_{ct}}_{\text{section homogène réduite}}$$

avec :

A_c = aire totale du béton,

A_s = section d'aciers,

A_{ct} = aire de la zone de béton éventuellement tendu.

2.3.3 Coefficient d'équivalence

Les formules de la résistance des matériaux sont appliquées aux sections homogènes.

α_e est le coefficient d'équivalence, théoriquement égal à $E_s/E_{c,\,eff}$. Mais si E_s est constant, $E_{c,\,eff}$ dépend de la durée d'application des charges et varie entre E_{cm} et $E_{c,\,eff}$ (voir chapitre 2 : « Matériaux »).

On pose[19] :

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{c,\,eff}}$$

Ainsi, dans un état limite de service par limitation des contraintes, la contrainte d'une fibre d'acier est égale à α_e fois la contrainte de la fibre de béton qui aurait le même centre de gravité.

2.3.4 Limitation de la contrainte de compression du béton

Pour éviter l'apparition de fissures longitudinales, à moins que des mesures spéciales, telles que l'augmentation de l'enrobage des aciers comprimés ou le confinement par des armatures transversales, n'aient été prises, la contrainte de

19. EC 2 – 7.4.3 (6)

compression du béton pour les classes d'exposition XD, XF ou XS est limitée sous la combinaison caractéristique des charges à[20] :

$$\overline{\sigma_c} = k_1.f_{ck}$$

avec : $k_1 = 0,6$, valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[21].

Dans le cas des ponts, en présence d'un confinement par des armatures transversales, la valeur recommandée de l'augmentation de la contrainte-limite de compression du béton[22] est de 10 % :

2.3.5 Limitation de la contrainte de traction de l'acier

Afin de respecter les exigences de durabilité et d'éviter une ouverture excessive des fissures, la contrainte de traction des armatures sous la combinaison caractéristique des charges est limitée à[23] :

$$\overline{\sigma_s} = k_3.f_{yk}$$

avec : $k_3 = 0,8$, valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[24].

Ceci n'est guère contraignant car la contrainte de l'acier en service d'une section dimensionnée à l'état limite ultime (voir § 4.1 du chapitre 7 : « Flexion simple ») est telle que : $0,5.f_{yk} \leq \sigma_s \leq 0,7.f_{yk}$.

Sous l'effet des seules déformations imposées, cette limite devient :

$$\overline{\sigma_s} = k_4.f_{yk}$$

avec : $k_4 = 1$, valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[25].

2.3.6 Calcul des contraintes

Ce calcul est fait selon le cas[26] :

- soit en section homogène non fissurée, si la contrainte maximale du béton en traction calculée sous les combinaisons rares est inférieure à $f_{ct,\,eff}$ (voir § 2.3.1, hypothèse H_3) ;

---

20. EC 2 – 7.2 (2)
21. EC 2 – voir AN
22. EC 2 – 7.2 (102)
23. EC 2 – 7.2 (5)
24. EC 2 – voir AN
25. EC 2 – voir AN
26. EC 2 – 7.1 (2)

- soit en section fissurée, dans le cas contraire, en négligeant toute contribution du béton tendu.

Pour le calcul des contraintes, il faut en outre tenir compte :

- des effets du retrait et du fluage ;
- des autres actions indirectes, telles que la température.

2.3.7 États limites de fissuration

La vérification a pour objet de s'assurer que l'ouverture maximale calculée des fissures n'excède pas une limite fixée en accord avec le client en fonction de la nature et de la destination de l'ouvrage, et du coût résultant de cette limitation[27].

La limitation de l'ouverture des fissures est obtenue :

- en prévoyant un pourcentage minimal d'armatures adhérentes déterminé de manière que la limite d'élasticité de l'armature ne soit pas atteinte avant la charge de fissuration ;
- en limitant les distances entre les barres et les diamètres de celles-ci.

Voir chapitre 3 : « État limite de service de fissuration », *Maîtrise de l'eurocode* 2, J. Roux, Éditions Eyrolles, 2009.

2.4 Hypothèses supplémentaires pour l'état limite ultime de résistance (ELU)

2.4.1 Hypothèses supplémentaires

H_3) La résistance du béton tendu est négligée[28].

H_4) Le raccourcissement relatif du béton est limité, selon le diagramme contraintes-déformations utilisé pour le béton (voir § 2.4.2.2) à[29] :

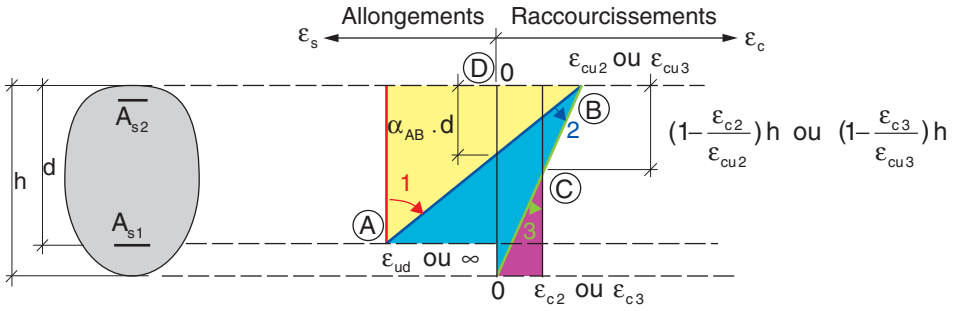
ε_{cu2} ou ε_{cu3} en flexion ;

ε_{c2} ou ε_{c3} en compression simple.

H_5) L'allongement relatif de l'acier tendu est limité à ε_{ud} ou illimité selon le diagramme contraintes-déformations de calcul utilisé (voir § 2.4.2.1).

H_6) Le dimensionnement à l'état limite ultime est conduit en supposant que le diagramme des déformations passe par l'un des trois pivots *A*, *B* ou *C* définis ci-dessous (règle des trois pivots)[30] :

27. EC 2 – 7.3.1
28. EC 2 – 6.1 (2)P
29. EC 2 – 6.1 (3)P
30. EC 2 – 6.1 (6)



Pivot A - Région 1 :

- allongement de l'acier le plus tendu : ε_{ud} ou ∞ ;
- pièces soumises à la traction simple ou à la flexion simple ou composée.

Pivot B - Région 2 :

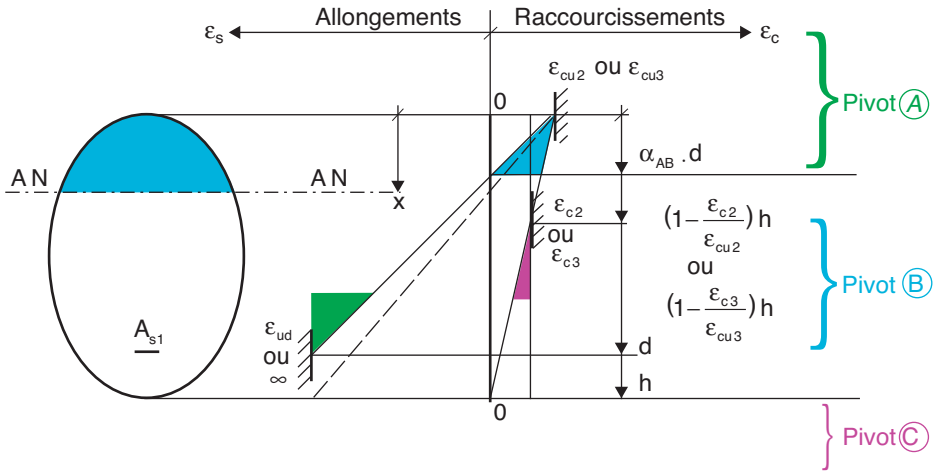
- raccourcissement de la fibre de béton la plus comprimée : ε_{cu2} ou ε_{cu3} ;
- pièces soumises à la flexion simple ou composée.

Pivot C - Région 3 :

- raccourcissement de la fibre de béton à la distance $\left(1-\frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu2}}\right)h$ ou $\left(1-\frac{\varepsilon_{c3}}{\varepsilon_{cu3}}\right)h$ de la fibre la plus comprimée : ε_{c2} ou ε_{c3} ;
- pièces soumises à la flexion composée ou à la compression simple.

Remarque

Quand on connaît la position de l'axe neutre (AN = axe des déformations nulles), le pivot est immédiatement connu. De même, quand on connaît le pivot, on sait dans quelle zone de la section droite va se situer l'axe neutre.



$x \leq \alpha_{AB}.d \Rightarrow$ Pivot A,

$\alpha_{AB}.d < x \leq d \Rightarrow$ Pivot B,

$x > d \Rightarrow$ Pivot C,

les valeurs de α_{AB} sont données au § 2.1.3 du chapitre 7 : « Flexion simple ».

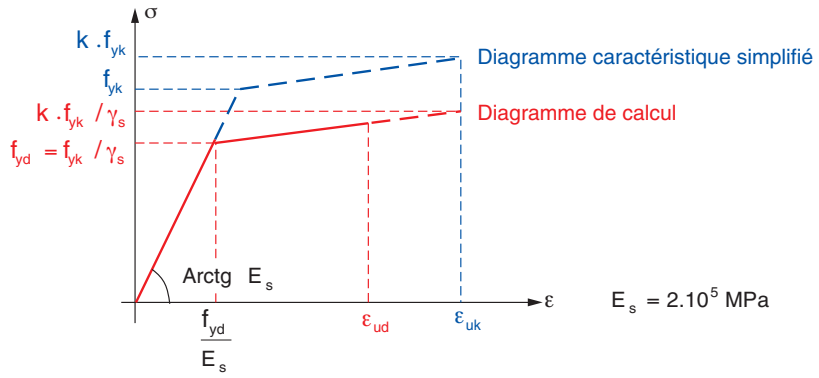
2.4.2 Diagrammes contraintes-déformations de calcul

2.4.2.1 Aciers

E_s étant pratiquement constant et ne dépendant pas de f_{yk}, le diagramme de calcul se déduit du diagramme caractéristique (expérimental) simplifié par une affinité sensiblement parallèle à la droite de Hooke et de rapport égal[31] à $1/\gamma_s$.

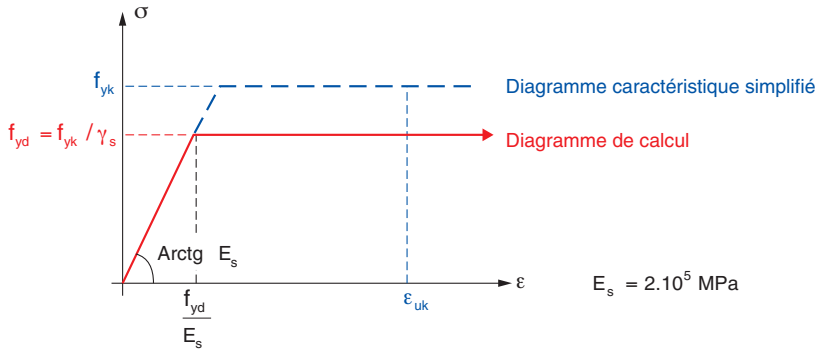
On peut utiliser l'un ou l'autre des deux diagrammes contraintes-déformations ci-après.

Diagramme à palier incliné



ou

Diagramme à palier horizontal



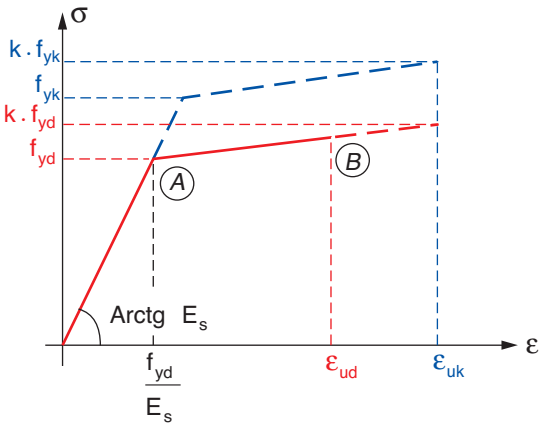
31. EC 2 – 3.2.7 (2)

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$$ [32] avec : $\gamma_s = \begin{cases} 1,00 \text{ pour les situations accidentelles,} \\ 1,15 \text{ dans les autres cas.} \end{cases}$

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s}$$

Remarque

Pour le diagramme à palier incliné, nous avons :



équation de la droite AB :

$$\sigma_s = f_{yd} + \frac{k.f_{yd} - f_{yd}}{\varepsilon_{uk} - \frac{f_{yd}}{E_s}}\left[\varepsilon_s - \frac{f_{yd}}{E_s}\right] = \left[1 - \frac{f_{yd}(k-1)}{E_s.\varepsilon_{uk} - f_{yd}}\right] f_{yd} + \frac{f_{yd}(k-1)}{\varepsilon_{uk} - \frac{f_{yd}}{E_s}}\,\varepsilon_s$$

pour des aciers à ductilité normale (classe A) : $\varepsilon_{uk} = 2,5\ \%$ et $\frac{f_{tk}}{f_{yk}} = 1,08$ avec[33] : $\varepsilon_s \nearrow \varepsilon_{ud} = 0,9.\varepsilon_{uk} = 22,5\ ‰$ (valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[34]) d'où :

- S 400 : $\sigma_s = 346,53 + 747,66.\varepsilon_s \nearrow 363$ (MPa)
- S 500 : $\sigma_s = 432,71 + 952,38.\varepsilon_s \nearrow 454$ (MPa)

32. EC 2 – 2.4.2.4 (1)
33. EC 2 – annexe C1
34. EC 2 – 3.2.7 (2) + AN

pour des aciers à haute ductilité (classe B) : $\varepsilon_{uk} = 5\ \%$ et $\frac{f_{tk}}{f_{yk}} = 1{,}08$ avec[35] : $\varepsilon_s \nearrow \varepsilon_{ud} = 0{,}9.\varepsilon_{uk} = 45$ ‰ (valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[36]) d'où :

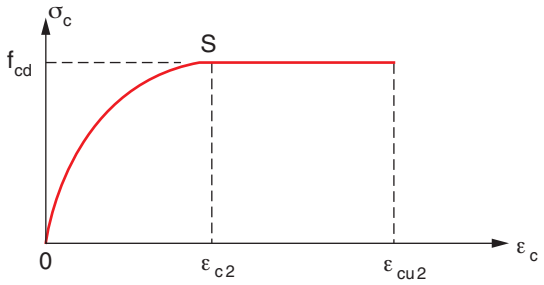
- S 400 : $\sigma_s = 346{,}82 + 576{,}58.\varepsilon_s \nearrow 373$ (MPa)
- S 500 : $\sigma_s = 433{,}20 + 727{,}27.\varepsilon_s \nearrow 466$ (MPa)

pour des aciers à très haute ductilité (classe C) : $\varepsilon_{uk} = 7{,}5\%$ et $\frac{f_{tk}}{f_{yk}} = 1{,}15$ avec[37] : $\varepsilon_s \nearrow \varepsilon_{ud} = 0{,}9.\varepsilon_{uk} = 67{,}5$ ‰ (valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[38]) d'où :

- S 400 : $\sigma_s = 346{,}59 + 712{,}17.\varepsilon_s \nearrow 395$ (MPa)
- S 500 : $\sigma_s = 432{,}84 + 895{,}52.\varepsilon_s \nearrow 493$ (MPa)

2.4.2.2 Béton – Calcul des sections[39]

Pour le calcul des sections, on utilise le diagramme idéalisé dit « parabole-rectangle », constitué par un arc de parabole du second degré prolongé par un segment de droite.



OS = parabole tangente en S à l'horizontale,

$$\sigma_c = \begin{cases} f_{cd}\left[1 - \left(1 - \dfrac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}}\right)^n\right] & \text{si } 0 \le \varepsilon_c \le \varepsilon_{c2} \\ f_{cd} \quad \text{si } \varepsilon_c > \varepsilon_{c2} \end{cases}$$

ε_{c2} donné par le tableau du § 2.2.4 au chapitre 2 : « Matériaux »,

35. EC 2 – annexe C1
36. EC 2 – 3.2.7 (2) + AN
37. EC 2 – annexe C1
38. EC 2 – 3.2.7 (2) + AN
39. EC 2 – 3.1.7

n = exposant figurant dans le tableau du § 2.4.2.3 ci-après (n = 2 pour $f_{ck} \leq 50$ MPa).

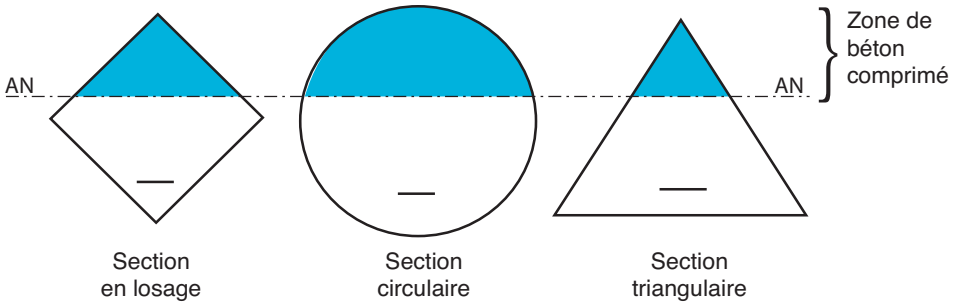
$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$ [40] avec : $\gamma_c = \begin{cases} 1,2 \text{ pour les situations accidentelles,} \\ 1,5 \text{ dans les autres cas.} \end{cases}$

- pour les bâtiments : $\alpha_{cc} = 1$ valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[41] ;
- pour les ponts : $\alpha_{cc} = 0,85$ valeur recommandée[42]. L'Annexe nationale française préconise $\alpha_{cc} = 1$.

Le coefficient $0,8 \leq \alpha_{cc} \leq 1$ tient compte de l'effet défavorable de la durée d'application des charges, vis-à-vis de l'essai de courte durée utilisé pour définir f_{ck}.

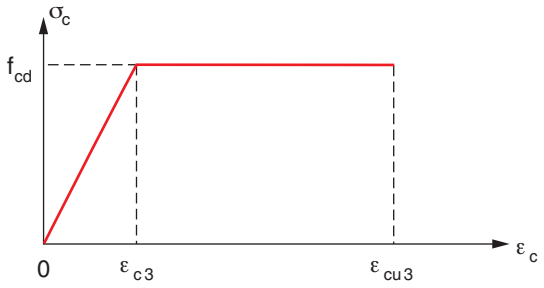
En pratique, lorsque les pivots sont les pivots A ou B, on peut substituer à ce diagramme un diagramme rectangulaire équivalent (voir chapitre 7 : « Flexion simple[43] »).

Dans ce cas, lorsque la zone comprimée a une largeur décroissante vers les fibres les plus comprimées, on réduit le coefficient α_{cc} de 10 %. C'est le cas par exemple des sections ci-dessous[44] :



On peut aussi utiliser d'autres diagrammes contraintes-déformations simplifiés équivalents ou plus conservateurs que le diagramme parabole-rectangle comme par exemple[45] :

40. EC 2 – 3.1.6 (1)P et 2.4.2.4 (1)
41. EC 2 – voir AN
42. EC 2 – 3.1.6 (101)P
43. EC 2 – 3.1.7 (3)
44. EC 2 – 3.1.7 (3)
45. EC 2 – 3.1.7 (2)



2.4.2.3 Béton – Analyse non linéaire[46]

Pour le calcul des effets du second ordre et pour des charges de courte durée d'application, on utilise le diagramme de calcul défini de la manière suivante :

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k.\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta} \qquad \textbf{(3.14)}$$

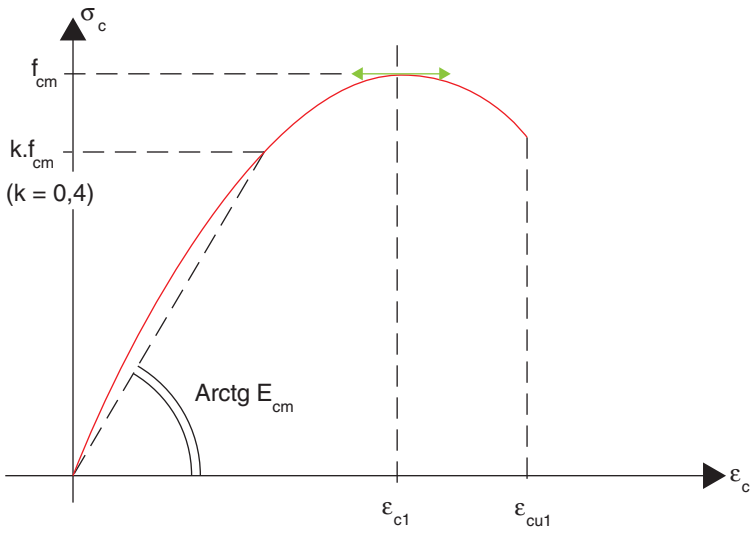
avec :

$\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}$ où ε_c et ε_{c1} sont pris en valeur absolue,

$\varepsilon_{c1} = 0,7.f_{cm}^{0,31}$ = déformation correspondant au pic de la courbe σ–ε (voir tableau du § 2.2.4, chapitre 2 « Matériaux », complété par les valeurs ci-dessous),

$$k = 1,05\frac{E_{cm}.|\varepsilon_{c1}|}{f_{cm}}$$

46. EC 2 – 3.1.5



Classe de résistance du béton	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60	C55/67	C60/75	C70/85	C80/95	C90/105
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
ε_{c1} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8
ε_{cu1} (‰)	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8
n	2									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4

Les classes les plus utilisées correspondent aux colonnes grisées du tableau ci-dessus. La valeur maximale recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française est C90/105[47].

L'EC 2 laisse la possibilité d'utiliser un autre diagramme contraintes-déformations dans la mesure où celui-ci représente bien le comportement du béton[48]. Cette possibilité n'est pas admise pour les ponts.

47. EC 2 – voir AN
48. EC 2 – 3.1.5 (2) + 5.8.6 (2)P

4 Dispositions constructives

I. RAPPELS THÉORIQUES

1. Généralités

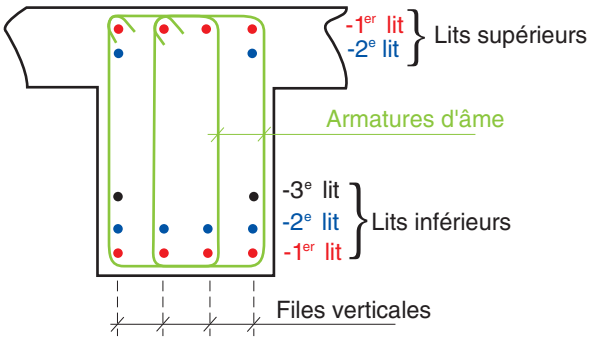
1.1 Définitions

Pour simplifier, on considère le cas d'une poutre horizontale à plan moyen.

Les armatures dites « longitudinales » sont toujours disposées en nappes horizontales (ou lits horizontaux) et en files verticales.

Les files des lits inférieurs et supérieurs doivent se correspondre de façon :

- à réserver des passages verticaux pour la mise en place du béton ;
- et à simplifier le tracé des armatures d'âme verticales.

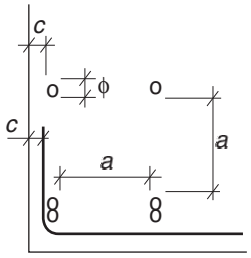


1.2 Classes d'exposition en fonction des conditions d'environnement

Les conditions d'environnement sont les conditions physiques et chimiques auxquelles les constructions sont exposées en plus des conditions mécaniques.

Elles sont classées en six classes d'exposition comme indiqué dans le tableau du § 2.1. au chapitre 3 : « Béton armé – Généralités ».

2. Disposition des armatures



2.1 Enrobage

On appelle enrobage la distance du nu d'une armature à l'arrase de béton la plus proche (c = *cover* en anglais).

L'« enrobage nominal » doit être spécifié sur les plans[1] :

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \qquad \textbf{(4.1)}$$

avec :

c_{min} = enrobage minimal,

Δc_{dev} = marge pour tolérances d'exécution.

2.2 Enrobage minimal

L'« enrobage minimal » doit être assuré afin de garantir[2] :

- une transmission correcte des forces d'adhérence ;
- la protection de l'acier contre la corrosion ;
- une résistance au feu convenable.

$$c_{min} = \text{Max} \begin{cases} c_{min,\,b}, \\ c_{min,\,dur} + \Delta c_{dur,\,\gamma} - \Delta c_{dur,\,st} - \Delta c_{dur,\,add}, \\ 10 \text{ mm}. \end{cases}^{3} \qquad \textbf{(4.2)}$$

1. EC 2 – 4.4.1.1
2. EC 2 – 4.4.1.2 (1)P
3. EC 2 – 4.4.1.2 (2)P

avec :

$c_{min,\ b}$ enrobage minimal vis-à-vis des exigences d'adhérence,

$c_{min,\ dur}$ enrobage minimal vis-à-vis des conditions d'environnement,

$\Delta c_{dur,\ \gamma}$ marge de sécurité,

$\Delta c_{dur,\ st}$ réduction de l'enrobage minimal dans le cas d'acier inoxydable,

$\Delta c_{dur,\ add}$ réduction de l'enrobage minimal dans le cas de protection supplémentaire.

2.2.1 Enrobage minimal $c_{min,\ b}$ requis vis-à-vis de l'adhérence

Il est donné par le tableau ci-après[4] :

Disposition des armatures	Enrobage minimal $c_{min,\ b}$*
Armature individuelle	Diamètre de la barre
Paquet	Diamètre équivalent (ϕ_n) (voir § 8.1)
* si la dimension nominale du plus gros granulat est supérieure à 32 mm, il convient de majorer $c_{min,\ b}$ de 5 mm.	

2.2.2 Enrobage minimal $c_{min,\ dur}$ vis-à-vis des conditions d'environnement

En fonction de la classe d'exposition (voir tableau du § 2.1, chapitre 3 : « Béton armé – Généralités », p. 62) et de la classe structurale (durée d'utilisation du projet), on retient les valeurs recommandées et à utiliser pour l'Annexe nationale française suivantes en mm[5] :

Classe structurale	**Classes d'exposition**						
	X0	**XC1**	**XC2 / XC3**	**XC4**	**XD1 / XS1**	**XD2 / XS2 XF2[1)]**	**XD3 / XS3 XF4[2)]**
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55
1) EC 2 – 4.2 (106) 2) EC 2 – 4.2 (106)							

L'enrobage minimal vis-à-vis des conditions d'environnement donné pour les classes d'exposition XF2 et XF4 s'applique uniquement aux ponts.

4. EC 2 – 4.4.1.2 (3)
5. EC 2 – 4.4.1.2 (5) + AN

2.2.3 Marge de sécurité $\Delta c_{dur,\ \gamma}$

La valeur de $\Delta c_{dur,\ \gamma}$ à utiliser dans un pays donné peut être fournie par son Annexe nationale. La valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française est[6] :

$$\boxed{\Delta c_{dur,\ \gamma} = 0 \text{ mm}}$$ [7]

2.2.4 Réduction $\Delta c_{dur,\ st}$ de l'enrobage minimal dans le cas d'acier inoxydable

Lorsque l'on utilise de l'acier inoxydable ou que l'on prend d'autres dispositions particulières, il convient d'en considérer les effets pour l'ensemble des propriétés des matériaux concernés, y compris l'adhérence. La valeur de $\Delta c_{dur,\ st}$ à utiliser dans un pays donné peut être fournie par son Annexe nationale. La valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française est[8] :

$$\boxed{\Delta c_{dur,\ st} = 0 \text{ mm}}$$ [9]

Dans le cas où les documents du marché fixent une autre valeur de $\Delta c_{dur,\ st}$, l'Annexe nationale française précise que le choix des matériaux, les parametres de mise en œuvre et de maintenance doivent faire l'objet d'une étude particulière[10].

2.2.5 Réduction $\Delta c_{dur,\ add}$ de l'enrobage minimal dans le cas de protection supplémentaire

Dans le cas d'un béton bénéficiant d'une protection supplémentaire (revêtement, par exemple), l'enrobage minimal peut être réduit de[11] :

$$\boxed{\Delta c_{dur,\ add} = 0 \text{ mm}}$$

valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[12].

Pour les revêtements adhérents justifiés vis-à-vis de la pénétration des agents agressifs pendant la durée d'utilisation de projet et réputés faisant partie intégrante de la structure, l'Annexe nationale française impose :

$$\boxed{c_{min} = \text{Max} \begin{cases} c_{min,\ b}, \\ 10 \text{ mm}. \end{cases}}$$ [13]

---

6. EC 2 – 4.4.1.2 (6)
7. EC 2 – voir AN
8. EC 2 – 4.4.1.2 (7)
9. EC 2 – voir AN
10. EC 2 – voir AN
11. EC 2 – 4.4.1.2 (8)
12. EC 2 – voir AN
13. EC 2 – voir AN

2.2.6 Prise en compte des tolérances d'exécution

Pour le calcul de l'enrobage nominal c_{nom}, l'enrobage minimal doit être majoré, au niveau du projet, des tolérances couvrant les écarts d'exécution. La valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française est[14] :

$$\boxed{\Delta c_{dev} = 10 \text{ mm}}$$ [15]

Remarque

On peut être amené à augmenter l'enrobage dans le cas :

- de l'abrasion du béton[16] ;
- d'un béton coulé au contact de surfaces irrégulières[17] ;
- des tabliers de ponts routiers en béton brut[18] ;
- de l'abrasion sous l'action de la glace ou du transport solide dans l'eau courante[19].

Dans le cas d'un béton coulé en place au contact d'une surface existante de béton (préfabriqué ou coulé en place), on peut prendre la valeur recommandée suivante[20] :

$$\boxed{c_{min} = c_{min,\ b}}$$

lorsque les conditions suivantes sont remplies :

- la surface de béton existante n'a pas été soumise à un environnement extérieur pendant plus de 28 jours ;
- la surface de béton existante est rugueuse ;
- la classe de résistance du béton existant est au moins C25/30.

2.3 Distances entre barres

Les barres d'acier sont disposées :

- de manière isolée ;
- en paquet vertical de deux barres ;
- en paquet (horizontal) de deux, trois ou quatre barres (voir § 8, p. 111).

---

14. EC 2 – 4.4.1.3
15. EC 2 – voir AN
16. EC 2 – 4.4.1.2 (13)
17. EC 2 – 4.4.1.3 (4)
18. EC 2 – 4.4.1.2 (114)
19. EC 2 – 4.4.1.2 (115)
20. EC 2 – 4.4.1.2 (9)

Espacement libre vertical ou horizontal[21] :

$$a \geq \text{Max} \begin{cases} k_1.\phi \\ 20 \text{ mm} \\ d_g + k_2 \text{ mm} \end{cases}$$

avec :

a = distances libres verticale et horizontale entre :

- deux barres isolées ;
- ou deux paquets de deux, trois ou quatre barres ;
- ou une barre isolée et un paquet de deux, trois ou quatre barres ;

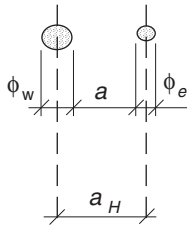
d_g = grosseur maximale du granulat utilisé dans le béton (2,5 cm en général),

ϕ = diamètre de la barre,

$k_1 = 1$: valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[22],

$k_2 = 5$ mm : valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[23].

La distance entre axes des files verticales doit être telle que le bétonnage puisse être réalisé correctement entre elles (pour ménager le passage des aiguilles de vibration du béton, par exemple) :



$$\phi = \text{Max} \begin{cases} \phi_w \\ \phi_e \end{cases}$$

À titre indicatif et sans que cela soit une obligation réglementaire, on peut prendre :

$$a_H = a + \frac{\phi_w + \phi_e}{2} \geq \begin{cases} 8 \text{ cm si } \phi < 25 \text{ mm}, \\ 10 \text{ cm si } \phi \geq 25 \text{ mm}. \end{cases}$$

21. EC 2 – 8.2 (2)
22. EC 2 – voir AN
23. EC 2 – voir AN

3. Contrainte d'adhérence

3.1 Adhérence des barres droites

3.1.1 Définition

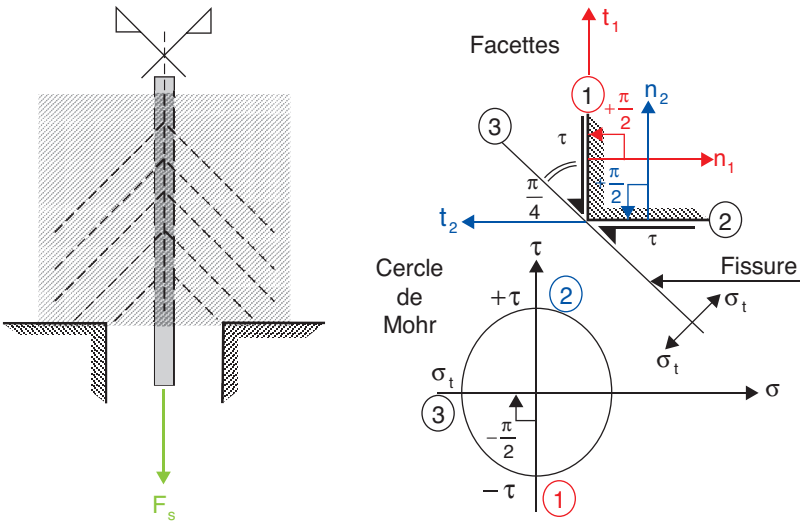
La résistance d'une pièce en béton armé suppose que les glissements éventuels des armatures par rapport à la gaine de béton qui les enrobe sont limités à des valeurs tolérables.

On appelle « adhérence » l'action des forces de liaison qui s'opposent au glissement. L'adhérence joue trois rôles :

1/ elle assure le « scellement » ou « ancrage » des barres arrêtées ;
2/ elle assure l'« entraînement » des armatures sous l'effort de glissement longitudinal provoqué par l'effort tranchant (voir chapitre 8 : « Effort tranchant », p. 293) ;
3/ elle intervient pour distribuer la fissuration.

3.1.2 Faits expérimentaux – Théorie de M. Caquot

L'effort qu'il faut exercer pour extraire par traction une barre rectiligne noyée dans un bloc de béton demeure important même après un glissement de plusieurs millimètres.



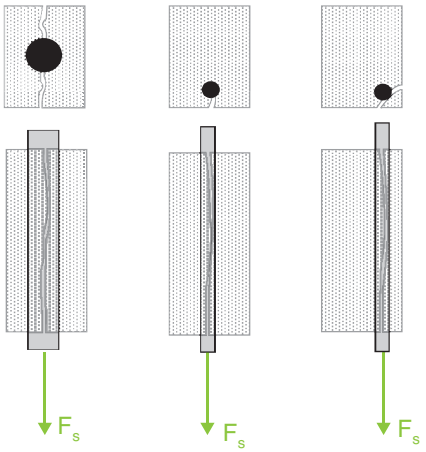
L'adhérence n'est donc pas un phénomène de collage, mais de frottement. Sous l'action de l'effort F_s, des contraintes de cisaillement se développent sur des surfaces cylindriques coaxiales à la barre. Si F_s croît, ces contraintes entraînent

la rupture du béton suivant des surfaces coniques de révolution formant un angle de 45° avec l'axe de la barre.

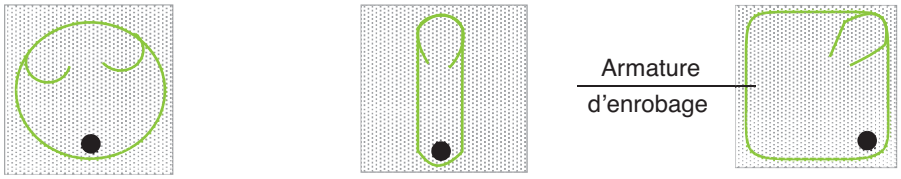
Les troncs de cône emboîtés ainsi formés tendent à se coincer sur la barre et à fonctionner comme des « encliquetages à frottement ».

La rupture d'adhérence peut se produire :

1/ par fissuration longitudinale du béton d'enrobage. La gaine de béton qui enserre la barre à la manière d'un étau s'ouvre et l'adhérence disparaît. C'est le cas par exemple de barres situées près d'une paroi ou d'un angle.



Pour se prémunir contre cette rupture, on « coud » l'intervalle barre-paroi par des armatures transversales dites d'« enrobage » ;



2/ par glissement de la barre sans rupture du béton d'enrobage. Ce glissement s'observe par exemple dans le cas d'une barre HA placée au centre d'un bloc de béton armé transversalement.

3.1.3 Facteurs dont dépend l'adhérence

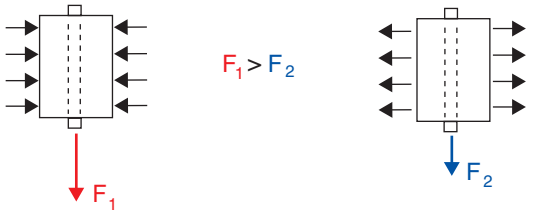
L'adhérence est d'autant plus grande que :

1/ la surface latérale des barres est plus rugueuse :
- barres rouillées > barres lisses non oxydées ;
- barres HA > ronds lisses bruts de laminage > fils tréfilés cylindriques,

2/ la gaine (= étau) de béton est plus épaisse et mieux cousue par des armatures transversales ;

3/ la résistance du béton à la traction est plus élevée ;

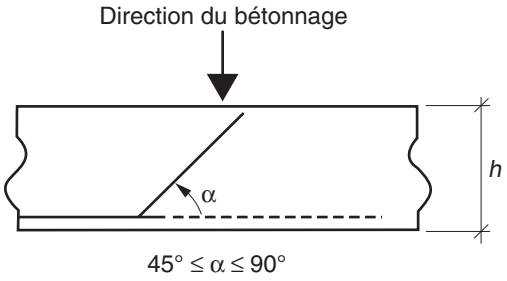
4/ l'« étau » constitué par la gaine de béton est plus serré : une compression transversale augmente l'adhérence, une traction transversale la diminue.



3.2 Conditions d'adhérence

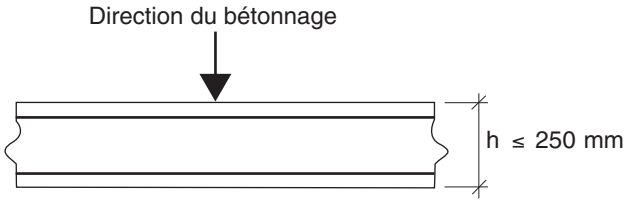
Les conditions d'adhérence sont jugées bonnes pour[24] :

- les barres qui ont une inclinaison comprise entre 45° et 90° par rapport à la normale à la direction du bétonnage (cas des armatures transversales des poutres et des armatures des poteaux) :

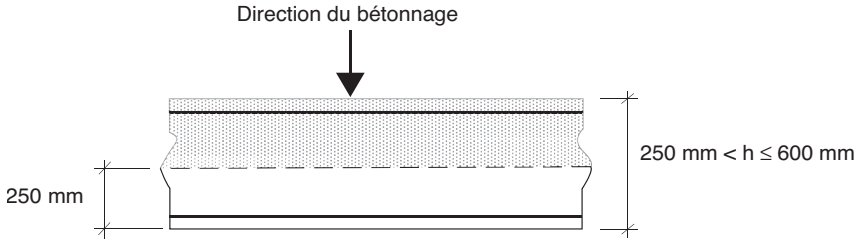


- les barres dont l'inclinaison est comprise entre 0° et 45° par rapport à la normale à la direction du bétonnage qui vérifient les conditions suivantes (les zones pochées sur les figures ci-dessous correspondent à des conditions d'adhérence médiocres) :
  - h ≤ 250 mm : toutes les barres (cas des armatures des dalles) :

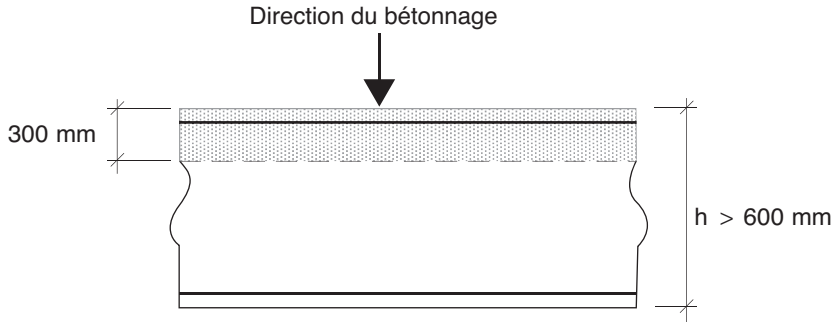
24. EC 2 – 8.4.2 (2)



– 250 mm < h ≤ 600 mm : barres à moins de 250 mm de la face inférieure (cas des armatures longitudinales inférieures des poutres courantes) :



– h > 600 mm : barres à plus de 300 mm de la face supérieure (cas des armatures longitudinales inférieures des poutres de « grande hauteur ») :



Toutes les autres conditions sont jugées médiocres.

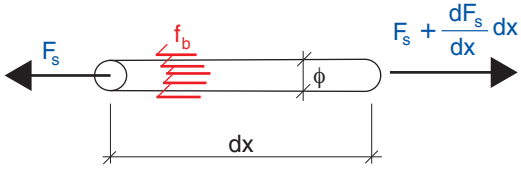
3.3 Contrainte d'adhérence moyenne

En supposant que la contrainte d'adhérence f_b est constante sur un tronçon de barre de longueur dx, soumis à ses extrémités aux forces de traction F_s et $F_s + dF_s$, nous pouvons écrire l'équation d'équilibre :

$$F_s + \frac{dF_s}{dx}\,dx - F_s - f_b.\pi.\phi.dx = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{dF_s}{dx} = \pi.\phi.f_b$$

La contrainte d'adhérence moyenne est égale au quotient de la variation de l'effort axial par le périmètre de l'armature :

$$f_b = \frac{\frac{dF_s}{dx}}{\pi.\phi}$$



3.4 Contrainte ultime d'adhérence

Pour assurer un ancrage correct, c'est-à-dire empêcher le glissement de l'armature dans la gaine de béton qui l'entoure, il faut limiter la contrainte d'adhérence à la valeur[25] :

$$\boxed{f_{bd} = 2,25.\eta_1.\eta_2.f_{ctd}} \qquad \textbf{(8.2)}$$

appelée contrainte ultime d'adhérence,

où :

$$\eta_1 = \begin{cases} 1 : \text{bonnes conditions d'adhérence,} \\ 0,7 : \text{conditions d'adhérence médiocres et barres des éléments} \\ \qquad \text{structuraux réalisés au moyen de coffrages glissants,} \end{cases}$$

$$\eta_2 = \begin{cases} 1 : \phi \leq 32 \text{ mm,} \\ \dfrac{132 - \phi}{100} : \phi > 32 \text{ mm.} \end{cases}$$

$\boxed{f_{ctd} = \alpha_{ct} \dfrac{f_{ctk,\ 0,05}}{\gamma_c}}$ = résistance de calcul en traction du béton[26],

$\alpha_{ct} = 1$, valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[27],

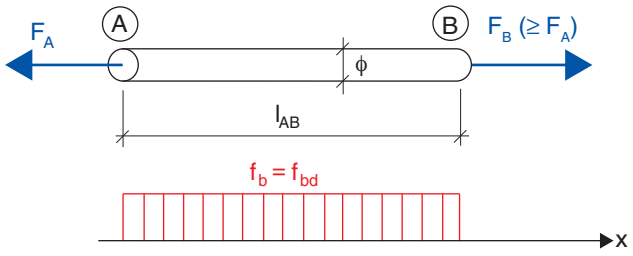
$f_{ctk,\ 0,05}$ = résistance caractéristique à la traction d'ordre 5 %, limitée à la valeur correspondant à la classe C60/75 (3,1 MPa) pour tenir compte de la fragilité croissante du béton avec sa résistance,

$$\gamma_c = \begin{cases} 1,2 \text{ pour les situations accidentelles,} \\ 1,5 \text{ dans les autres cas.} \end{cases}$$

25. EC 2 – 8.4.2 (2)
26. EC 2 – 3.1.6 (2)P
27. EC 2 – voir AN

3.5 Ancrage des barres droites tendues isolées

En supposant $f_b = f_{bd}$ = constante entre deux sections droites A et B distantes de l_{AB} et soumises respectivement aux efforts F_A et F_B ($> F_A$), on a :



$$f_b = \frac{\frac{dF}{dx}}{\pi.\phi} = f_{bd} \quad \Rightarrow \quad dF = \pi.\phi.f_{bd}.dx$$

d'où par intégration :

$$F_B - F_A = \pi.\phi.f_{bd}.l_{AB}$$

ce qui conduit à la relation :

$$F_B = F_A + \pi.\phi.f_{bd}.\, l_{AB}$$

Remarque

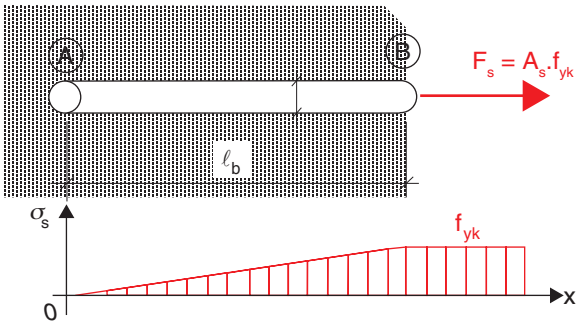
$$F_s = A_s.\sigma_s \quad \Rightarrow \quad dF_s = A_s.d\sigma_s = \pi.\phi.f_{bd}.dx$$

$$\Rightarrow \quad \frac{d\sigma_s}{dx} = \frac{\pi.\phi.f_{bd}}{A_s} \quad \Rightarrow \quad \sigma_s = \frac{\pi.\phi.f_{bd}}{A_s}x + Cste$$

et la contrainte dans l'armature varie linéairement.

Ancrer une barre, soumise dans une section B à un effort de traction F_s axial, c'est assurer, à partir de cette section, la transmission intégrale de cet effort au béton par adhérence.

Si $F_s = A_s.f_{yk} = \frac{\pi.\phi^2}{4} f_{yk}$ (ou si la contrainte en B vaut f_{yk}), on a un « ancrage total ».



3.6 Longueur « de scellement droit »

La longueur de scellement droit est la longueur nécessaire pour assurer un ancrage total[28] :

$$\left.\begin{array}{l} F_A = 0 \\ F_B = A_s.f_{yk} \\ l_{AB} = l_b \end{array}\right\} \Rightarrow \frac{\pi.\phi^2}{4} f_{yk} = 0 + \pi.\phi.l_b.f_{bd}$$

d'où :

$$\boxed{l_b = \frac{\phi}{4}.\frac{f_{yk}}{f_{bd}}}$$

3.7 Longueur d'ancrage « de référence »

On désigne par[29] :

$A_{s,\ req}$ = section d'armatures requise par le calcul ;

$A_{s,\ prov}$ = section d'armatures effectivement prévue ;

σ_{sd} = contrainte de calcul de la barre à l'origine de l'ancrage.

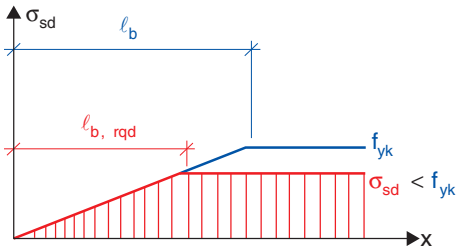
Comme : $A_{s,\ prov} \geq A_{s,\ req}$, on substitue à la longueur de scellement droit – l_b – la longueur d'ancrage de référence – $l_{b,\ rqd}$ – définie par :

28. EC 2 – 8.4.3 (2)
29. EC 2 – 8.4.3 (2)

$$\frac{l_{b,\,rqd}}{l_b} = \frac{\sigma_{sd}}{f_{yk}} \Rightarrow l_{b,\,rqd} = l_b \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{yk}}$$

$$A_{s,\,prov} \cdot \sigma_{sd} = A_{s,\,req} \cdot f_{yk}$$

$$\Rightarrow \frac{\sigma_{sd}}{f_{yk}} = \frac{A_{s,\,req}}{A_{s,\,prov}}$$



d'où :

$$\left.\begin{array}{l} l_{b,\,rqd} = l_b \dfrac{A_{s,\,req}}{A_{s,\,prov}} = l_b \dfrac{\sigma_{sd}}{f_{yk}} \not< l_{b,\,min} \\ l_b = \dfrac{\phi}{4} \cdot \dfrac{f_{yk}}{f_{bd}} \end{array}\right\} \Rightarrow \boxed{l_{b,\,rqd} = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}} \qquad \textbf{(8.3)}$$

3.8 Longueur d'ancrage « de calcul »

La longueur d'ancrage de calcul est définie par[30] :

$$\boxed{l_{bd} = \text{Max} \begin{cases} \alpha_1 . \alpha_2 . \alpha_3 . \alpha_4 . \alpha_5 . l_{b,\,rqd} \\ 0,7 . \alpha_1 . \alpha_4 . l_{b,\,rqd} \end{cases} \geq l_{b,\,min}} \qquad \textbf{(8.4)}$$

Pour les barres droites tendues[31] :

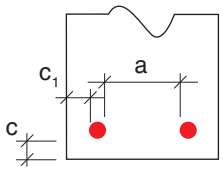
α_1, fonction de la forme des barres : $\alpha_1 = 1$ (barres droites tendues ou comprimées) ;

α_2, fonction des conditions d'enrobage :

$$\alpha_2 = 1 - 0,15 \frac{c_d - \phi}{\phi} \in [0,7 ; 1],$$

où :

30. EC 2 – 8.4.4 (1)
31. EC 2 – tableau 8.2



$$c_d = \text{Min}\left\{\frac{a}{2};\ c_1;\ c\right\}$$

α_3 , fonction du confinement par des armatures transversales :

$$\alpha_3 = 1 - K.\lambda \quad \in \left[0,7\,;1\right]$$

avec :

K, fonction de la position relative des armatures longitudinales et transversales :

$$K = \begin{cases} 0,1 : A_s \text{ dans l'angle d'une armature transversale,} \\ 0,05 : A_s \text{ sur la face intérieure d'une armature transversale,} \\ 0,00 : \text{autres cas,} \end{cases}$$

$$\lambda = \frac{\sum A_{st} - \sum A_{st,\,min}}{A_s}$$

où :

$\sum A_{st}$ = aire de la section des armatures transversales le long de l_{bd},

$$\sum A_{st,\,min} = \begin{cases} 0,25.A_s : \text{poutres,} \\ 0 : \text{dalles,} \end{cases}$$

A_s = aire de la section d'une barre ancrée individuelle de diamètre maximal,

α_4, fonction du confinement par des armatures transversales soudées le long de l_{bd} :

$\alpha_4 = 0,7$ si confinement, $\alpha_4 = 1$ sinon,

α_5, fonction des conditions de pression transversale :

$$\alpha_5 = 1 - 0,04.p \quad \in \left[0,7\,;1\right]$$

où :

p = pression transversale à l'ELU le long de l_{bd} en MPa.

$$l_{b,\,min} = \text{Max}\begin{cases} 0,3.l_{b,\,rqd} \\ 10.\phi, \\ 100\ \text{mm}. \end{cases} \qquad \textbf{(8.6)}$$

Pour les barres comprimées[32] :

$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1,\ \alpha_4 = 0,7$ ou 1 et α_5 sans objet,

$$l_{b,\,min} = \text{Max}\begin{cases} 0,6.l_{b,\,rqd} \\ 10.\phi, \\ 100\ \text{mm}. \end{cases} \qquad \textbf{(8.7)}$$

Remarque

Le coefficient α_3 n'est pas indépendant de la longueur d'ancrage de calcul (ou de recouvrement, comme nous le verrons au § 7.1.2). Comme il est au plus égal à 1, la longueur l_{bd} peut être évaluée en partant de $\alpha_3 = 1$ et réduite ensuite en se fixant la valeur du coefficient α_3. Dans ce cas, il y a lieu de prévoir des armatures transversales calculées de la manière suivante :

$$\alpha_3 = 1 - K.\lambda = 1 - K\frac{\sum A_{st} - \sum A_{st,\,min}}{A_s}$$

$$\Rightarrow \quad \frac{\sum A_{st} - \sum A_{st,\,min}}{A_s} = \frac{1-\alpha_3}{K}$$

$$\Rightarrow \quad \sum A_{st} = \frac{1-\alpha_3}{K} A_s + \sum A_{st,\,min}$$

en désignant par :

A_{st} = aire d'un cours d'armatures transversales,

s = espacement de ces armatures le long de l_{bd},

$l_0 = l_{bd}$ calculée avec la valeur de α_3 que l'on s'est donnée,

on obtient l'espacement des armatures transversales correspondant au coefficient α_3 choisi :

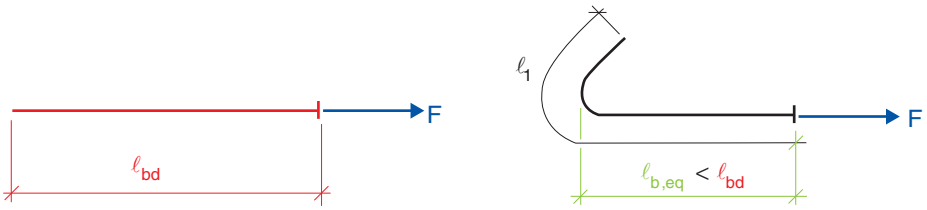
$$\frac{A_{st}}{s} = \frac{\sum A_{st}}{l_0} \quad \Rightarrow \quad s = \frac{A_{st}}{\frac{\sum A_{st}}{l_0}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{s = l_0 \frac{A_{st}}{\sum A_{st}}}.$$

32. EC 2 – tableau 8.2

3.9 Adhérence des barres courbes

3.9.1 Introduction

Lorsque l'encombrement d'un ancrage par scellement droit est excessif, on utilise des ancrages par courbure.



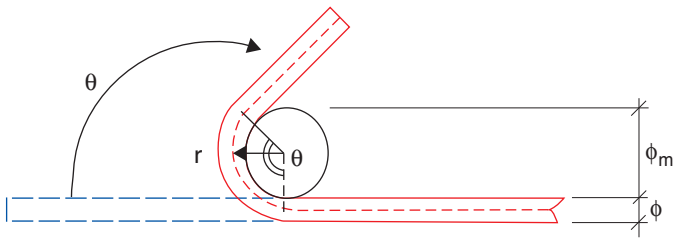
Un tel ancrage est défini par :

- le rayon r de l'axe de la barre : $r = \dfrac{(\phi_m + \phi)}{2}$

  avec :

  ϕ_m = diamètre du mandrin de cintrage,

  ϕ = diamètre de la barre,
- l'angle au centre θ de la partie courbe, supposée circulaire.

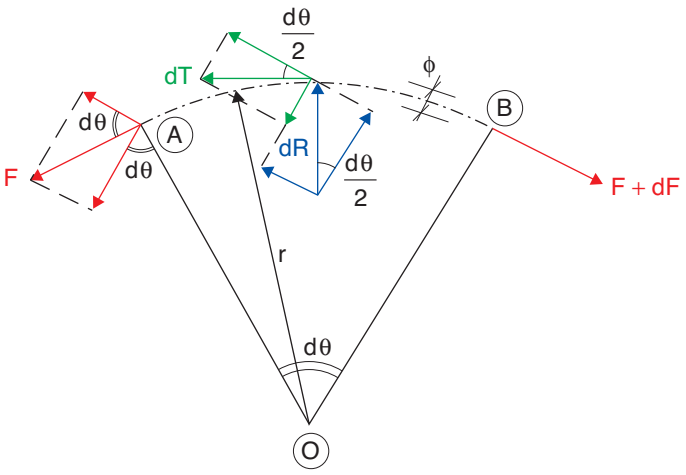


3.9.2 Hypothèses

1/ La liaison d'adhérence subsiste avec la même valeur que pour une barre droite.
2/ Il s'y ajoute un effet de frottement dit « effet de courroie » dû à la courbure.
3/ Le glissement de la barre dans sa gaine développe une contrainte d'adhérence égale à f_{bd}.

3.9.3 Adhérence des barres courbes

Considérons un tronçon de barre courbe tendue, infiniment petit, représenté par sa ligne moyenne AB d'ouverture dθ.



Il est soumis :

- aux forces de traction F en A et F + dF en B ;
- à la force dT due à l'adhérence sur l'arc AB = r.dθ ;
- à la réaction transversale du béton : dR.

Par projection des forces sur le rayon OB :

$$-F.\sin d\theta - dT.\sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) + dR.\cos\left(\frac{d\theta}{2}\right) = 0$$

soit puisque dθ et dT sont des infiniment petits et en négligeant les infiniment petits du second ordre :

$dR = F.d\theta$

En désignant par μ le coefficient de frottement acier sur béton, l'effort dR développe une force tangentielle :

$\mu.dR = \mu.F.d\theta$

de sens opposé au sens du glissement de la barre.

Par projection des forces sur la tangente en B à la barre :

$$F + dF - F.\cos d\theta - \mu.F.d\theta - dT.\cos\left(\frac{d\theta}{2}\right) = 0$$

$$dF - \mu.F.d\theta - \pi.\phi.r.d\theta.f_{bd} = 0$$

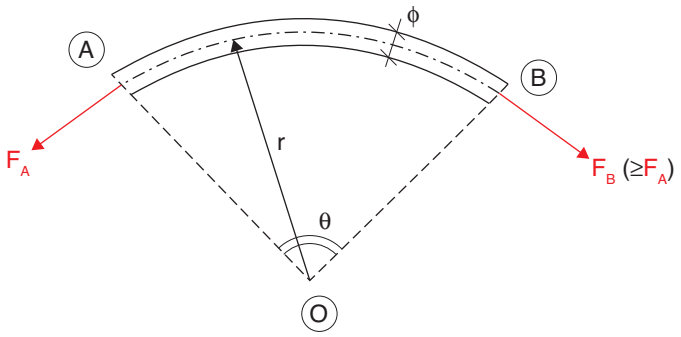
que l'on écrit :

$$dF - \mu.d\theta\left[F + \frac{\pi.\phi.r.f_{bd}}{\mu}\right] = 0$$

soit :

$$\frac{dF}{F + \frac{\pi.\phi.r.f_{bd}}{\mu}} = \mu.d\theta$$

Pour un tronçon courbe de barre AB d'angle au centre θ et soumis à ses extrémités aux efforts F_A et $F_B \left(\geq F_A\right)$:



par intégration entre A et B, il vient :

$$\left[\text{Log}\left(F + \frac{\pi.\phi.r.f_{bd}}{\mu}\right)\right]_A^B = \mu.\left[d\theta\right]_A^B$$

$$\text{Log}\left(\frac{F_B + \frac{\pi.\phi.r.f_{bd}}{\mu}}{F_A + \frac{\pi.\phi.r.f_{bd}}{\mu}}\right) = \mu.\theta$$

$$\frac{F_B + \frac{\pi.\phi.r.f_{bd}}{\mu}}{F_A + \frac{\pi.\phi.r.f_{bd}}{\mu}} = e^{\mu.\theta}$$

soit :

$$F_B = \underbrace{F_A.e^{\mu.\theta}}_{\substack{\text{effet}\\ \text{de}\\ \text{courroie}}} + \underbrace{\frac{\pi.\phi.r.f_{bd}}{\mu}\left[e^{\mu.\theta} - 1\right]}_{\substack{\text{effort}\\ \text{d'adhérence}}}$$

expression que l'on écrit :

$$F_B = \psi.F_A + \psi'.\pi.\phi.r.f_{bd}$$

avec :

$$\psi = e^{\mu.\theta},$$

$$\psi' = \frac{e^{\mu.\theta} - 1}{\mu} = \frac{\psi - 1}{\mu},$$

$$\mu = 0,4.$$

Remarque

Cette formule est à rapprocher de celle concernant les ancrages des barres droites isolées (voir § 3.5), la formule pour les ancrages courbes s'en déduisant :

- en multipliant F_A par ψ ;
- en multipliant $\pi.\phi.f_{bd}.l_{AB}$ par ψ' ;
- en faisant $l_{AB}=r$.

Comme $e^{\mu.\theta} - 1 \approx \left[1 + \mu.\theta + \frac{\mu^2.\theta^2}{2} - 1\right] > \mu.\theta$, la part de variation de l'effort due à l'adhérence est supérieure à :

$$\frac{\pi.\phi.r.f_{bd}}{\mu}.\mu.\theta = \pi.\phi.r.\theta.f_{bd} = \pi.\phi.\overset{\cap}{AB}.f_{bd}$$

soit la variation d'effort due à l'adhérence pour la barre droite de longueur développée AB.

4. Ancrage des barres

Les ancrages courbes ne peuvent être envisagés que pour des barres tendues[33].

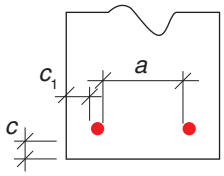
4.1 Types d'ancrages d'extrémité

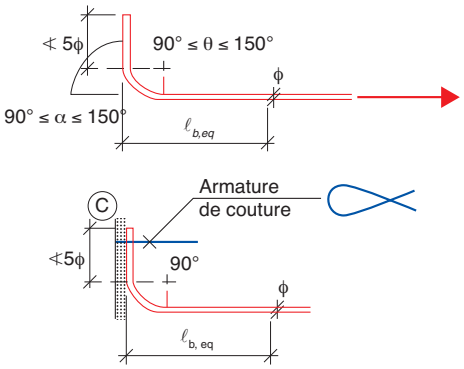
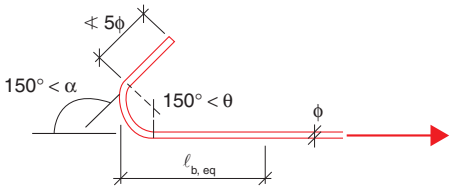
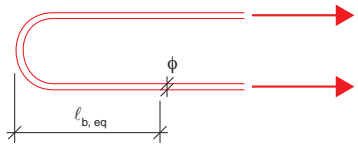
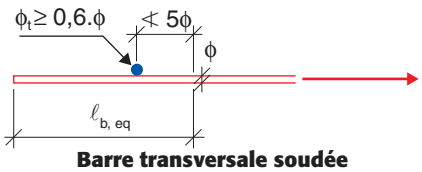
On utilise le plus couramment les ancrages figurés dans le tableau ci-après[34].

Pour ces ancrages, on prend en compte la longueur d'ancrage équivalente suivante[35] :

$$l_{b,\,eq} = \begin{cases} \alpha_1.l_{b,\,rqd} : \text{ancrages courbes,} \\ \alpha_4.l_{b,\,rqd} : \text{ancrages avec barre transversale soudée.} \end{cases}$$

33. EC 2 – 8.4.1 (3)
34. EC 2 – 8.4.1 (2)
35. EC 2 – 8.4.4 (2)



Type d'ancrage	α_1	α_4	Observations
 **Coude normal**	0,7 si $c_d > 3\phi$ sinon : 1 avec : $c_d = \text{Min}\left\{\frac{a}{2}; c_1\right\}$		« ancrages à 45°» (θ = 135°) fréquemment utilisés dans les semelles de fondation ; « ancrages à 60°» (θ = 120°) des armatures longitudinales des poutres de pont ; « retours d'équerre » (θ = 90°) qui nécessitent des armatures de couture pour éviter l'éclatement du béton au voisinage de *C*.
 **Crochet normal**	0,7 si $c_d > 3\phi$ sinon : 1 avec : $c_d = \text{Min}\left\{\frac{a}{2}; c_1\right\}$		crochets normaux (θ = 180°).
 **Boucle normale**	0,7 si $c_d > 3\phi$ sinon : 1 avec : $c_d = c$		boucle normale (θ = 180°).
 **Barre transversale soudée**		0,7	

4.2 Rayons de courbure de l'axe des barres

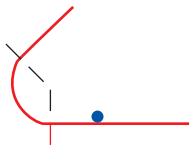
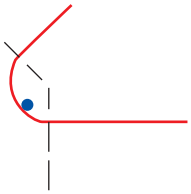
Ils résultent[36] :

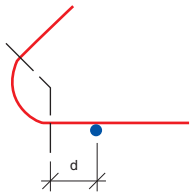
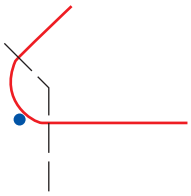
- des conditions de façonnage des barres ;
- de la condition de non-écrasement du béton.

Diamètres minimaux $\phi_{m,\,min}$ des mandrins de pliage des barres pour ne pas endommager les armatures :

Diamètre de la barre	$\phi_{m,\,min}$
$\phi \leq 16$ mm	$4.\phi$
$\phi > 16$ mm	$7.\phi$

Diamètres minimaux $\phi_{m,\,min}$ des mandrins de pliage des treillis soudés (valeurs recommandées et à utiliser pour l'Annexe nationale française)[37] :

Soudures à l'intérieur de la courbure	
	
$5.\phi$	

Soudures à l'extérieur de la courbure	
	
$5.\phi$ si $d \geq 3.\phi$, $20.\phi$ si $d < 3.\phi$	$20.\phi$

Il n'est pas nécessaire de justifier le diamètre du mandrin vis-à-vis de la rupture du béton si les conditions ci-après sont remplies[38] :

36. EC 2 – 8.3 (1)P
37. EC 2 – 8.3 (2) + AN
38. EC 2 – 8.3 (3)

- l'ancrage nécessaire de la barre ne dépasse pas 5.ϕ au-delà de l'extrémité de la partie courbe ;
- la barre n'est pas disposée près de la surface (plan de flexion proche du parement), et il existe une barre transversale de diamètre $\geq \phi$ à l'intérieur de la partie courbe ;
- le diamètre du mandrin est supérieur ou égal aux valeurs recommandées par le tableau ci-dessus.

Dans le cas contraire, il convient d'augmenter le diamètre du mandrin ϕ_m comme indiqué par l'expression :

$$\phi_m \geq F_{bt}\left(\frac{1}{a_b}+\frac{1}{2.\phi}\right)\frac{1}{f_{cd}} \qquad \textbf{(8.1)}$$

où :

$F_{bt} = \pi\frac{\phi^2}{4}\sigma_s$ = effort de traction dû aux charges ultimes à l'origine de la partie courbe,

$$a_b = \begin{cases} \frac{a}{2} : \text{barre intermédiaire d'un lit,} \\ c+\frac{\phi}{2} : \text{barre de rive d'un lit,} \end{cases}$$

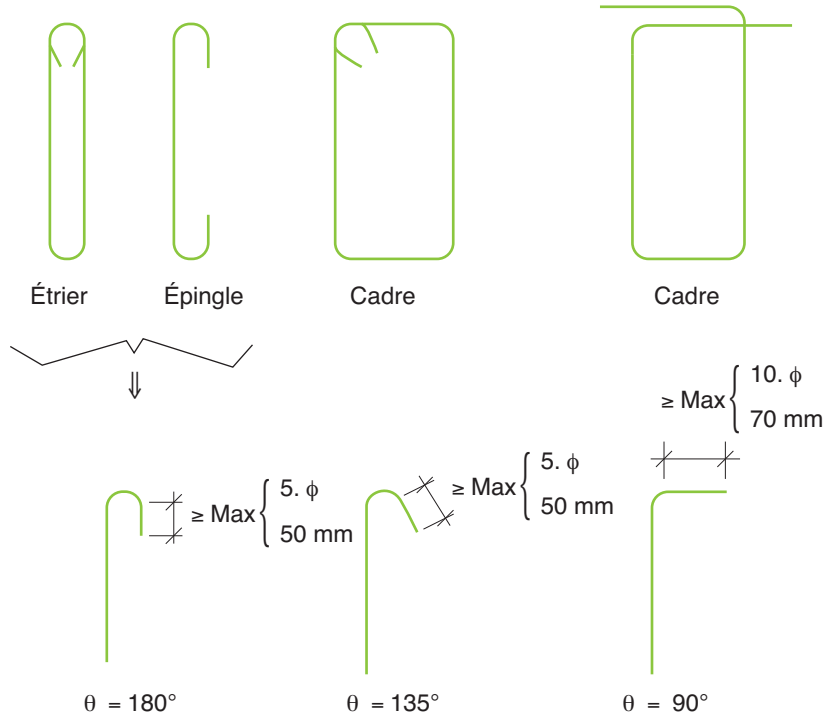
a = entraxe entre les barres (ou groupes de barres) perpendiculairement au plan de la courbure,

f_{cd} limité à sa valeur correspondant à la classe de béton C55/67.

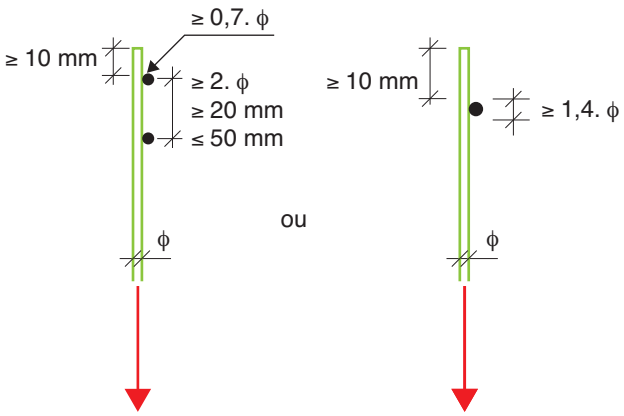
4.3 Ancrage total des cadres, étriers et épingles

L'ancrage des cadres, étriers et épingles est considéré comme satisfaisant si l'on respecte[39] :

39. EC 2 – 8.5



L'ancrage des barres rectilignes d'effort tranchant (échelles) est considéré comme satisfaisant s'il est réalisé par des barres soudées telles que :

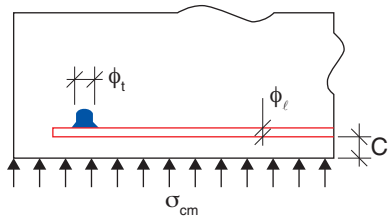


avec : $c_{nom} \geq \text{Max} \begin{cases} 3.\phi \\ 50 \text{ mm} \end{cases}$

et en vérifiant la résistance des soudures comme indiqué au § 5.

5. Ancrages au moyen de barres soudées

Outre les ancrages indiqués en 3.8, 4.1 et 4.3, on peut réaliser un ancrage au moyen de barres transversales soudées s'appuyant sur le béton. Il convient de démontrer que la qualité des assemblages soudés est correcte[40].



Dans ce cas, la longueur d'ancrage de référence à prendre en compte est réduite et a pour expression :

$$l_{b,\,rqd} = \frac{\phi_l}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd} - \frac{F_{btd}}{A_s}}{f_{bd}}$$

avec :

ϕ_l = diamètre de la barre à ancrer,

A_s = aire de la barre à ancrer,

F_{btd} = résistance à l'entraînement de la barre transversale donnée ci-après.

5.1 Cas d'une barre transversale de diamètre $14\ mm \le \phi_t \le 32\ mm$

La résistance à l'entraînement de la barre transversale vaut :

$$F_{btd} = \text{Min}\begin{cases} l_{td} \cdot \phi_t \cdot \sigma_{td} \\ F_{wd} \end{cases} \qquad \textbf{(8.8N)}$$

valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[41], avec :

$F_{wd} = 0,5.A_s.f_{yd}$ = résistance au cisaillement de la soudure (pour l'armature longitudinale),

40. EC 2 – 8.6
41. EC 2 – voir AN

$l_{td} = 1,16.\phi_t.\sqrt{\frac{f_{yd}}{\sigma_{td}}} \leq l_t$ = longueur de calcul de la barre transversale,

où :

$l_t = \text{Min}\begin{cases}\text{longueur de la barre transversale,}\\ \text{espacement des barres à ancrer,}\end{cases}$

$\sigma_{td} = \text{Min}\begin{cases}\dfrac{f_{ctd} + \sigma_{cm}}{0,015 + 0,14.e^{-(0,18.x)}}\\ 3.f_{cd}\end{cases}$ = contrainte du béton,

où :

σ_{cm} = contrainte de compression dans le béton, perpendiculairement aux deux barres,

$f_{ctd} = 0,7\frac{f_{ctm}}{\gamma_c}$ = contrainte de traction du béton,

$x = 2\frac{c}{\phi_t} + 1$ = facteur fonction de la géométrie,

c = enrobage perpendiculairement aux deux barres.

5.2 Cas d'une barre transversale de diamètre $\phi_t \leq 12$ mm

La résistance à l'entraînement de la barre transversale vaut :

$$F_{btd} = \text{Min}\begin{cases}16.A_s.f_{cd}.\dfrac{\phi_t}{\phi_l}\\ F_{wd}\end{cases} \qquad \textbf{(8.9)}$$

avec :

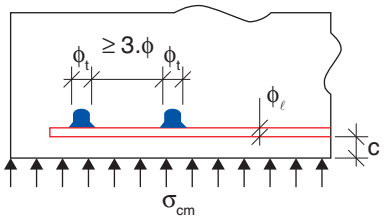
$F_{wd} = 0,5.A_s.f_{yd}$ = résistance au cisaillement de la soudure (pour l'armature longitudinale),

$\phi_l \leq 12$ mm

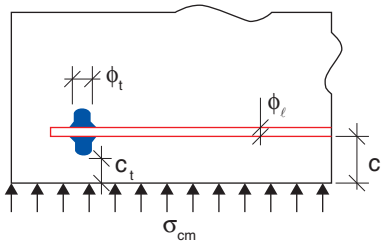
5.3 Cas de deux barres transversales soudées

5.3.1 Cas où 14 mm ≤ ϕ_t ≤ 32 mm

La résistance à l'entraînement des barres transversales à prendre en compte vaut :



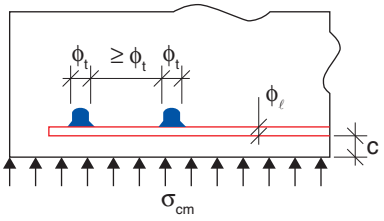
$1,41.F_{btd}$



$2.F_{btd}$ et $c_t \geq c_{nom}$

5.3.2 Cas où ϕ_t ≤ 12 mm

La résistance à l'entraînement des barres transversales à prendre en compte vaut :



$1,41.F_{btd}$

6. Efforts exercés par une barre courbe sur le béton

6.1 Introduction

Une barre courbe tendue développe sur le béton, du côté de sa concavité, une pression :

$$p = \frac{dR}{\phi.r.d\theta}$$

Comme $dR = F.d\theta$ (voir § 3.9.3.) et $F = \frac{\pi.\phi^2}{4}\sigma_s$:

$$p = \frac{\pi}{4}.\frac{\phi.\sigma_s}{r}$$

Cette pression est d'autant plus élevée que :

- r est plus faible ;
- σ_s est plus grand.

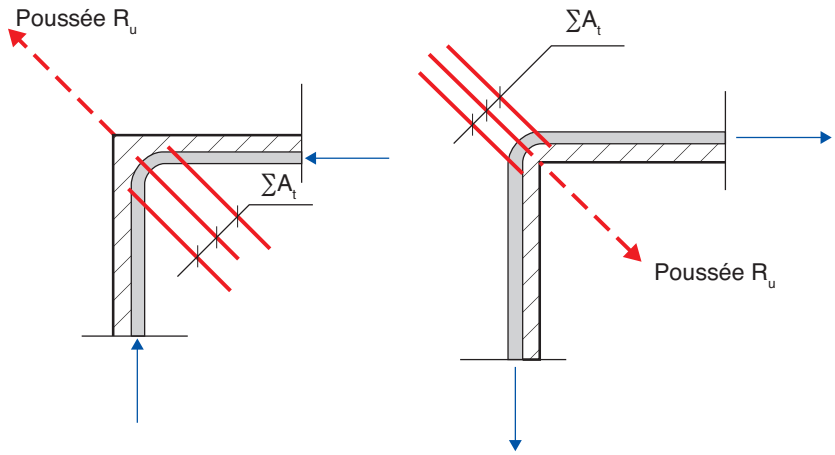
Elle est d'autant plus dangereuse que la distance du centre de courbure au parement voisin est plus faible.

Le danger est donc double car on a :

- risque de poussée au vide ;
- risque d'écrasement du béton.

6.2 Risque de poussée au vide

Cas des barres placées au voisinage des angles :



Barres comprimées suivant le contour d'un angle saillant

Barres tendues suivant le contour d'un angle rentrant

S'il est impossible d'éviter un tracé courbe donnant lieu à des « poussées au vide », il faut équilibrer ces poussées par des armatures transversales convenablement placées et ancrées, et de section telle que :

$$\sum A_t \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \geq R_u$$

6.3 Risque d'écrasement du béton

Dans ce cas, on a :

- risque d'écrasement du béton sous la barre ;
- risque de fendage dans le plan de la courbure.

On adopte un rayon de courbure supérieur à celui obtenu par le tableau du § 4.2.

7. Jonctions par recouvrement

Lorsque les longueurs des barres nécessaires dépassent les longueurs commerciales, on peut rétablir la continuité des différents tronçons en utilisant l'adhérence.

On fait alors chevaucher deux tronçons successifs sur une certaine longueur appelée : « longueur de recouvrement ».

On a parfois aussi recours :

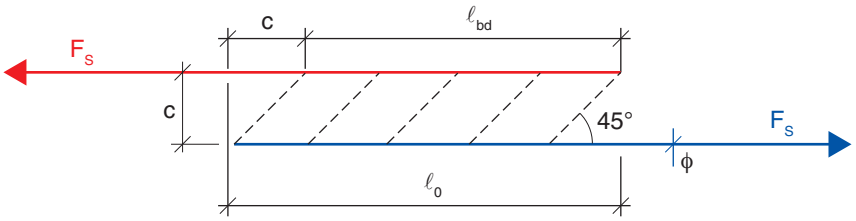
- au soudage, lorsque l'acier est soudable ;
- ou au manchonnage (coupleurs) pour les barres HA uniquement.

7.1 Recouvrement des barres

7.1.1 Transmission des efforts

Considérons deux barres parallèles :

- de même type (lisses ou HA) ;
- de même diamètre ϕ ;
- dont les axes sont distants de c ;
- se chevauchant sur une longueur l_0 ;
- soumises à deux forces de traction égales et opposées :



On admet que la transmission des efforts d'une barre à l'autre s'effectue par compression des « bielles » de béton découpées par des fissures inclinées à 45° sur la direction des barres.

Cette transmission n'est donc effective que sur la longueur :

$l_{bd} = l_0 - c$

7.1.2 Longueur de recouvrement l_0

Chaque barre doit être totalement ancrée d'où[42] :

$$l_0 = \text{Max} \begin{cases} \alpha_1.\alpha_2.\alpha_3.\alpha_4.\alpha_5.\alpha_6.l_{b,\,rqd} \\ 0,7.\alpha_1.\alpha_4.\alpha_6.l_{b,\,rqd} \\ l_{0,\,min} \end{cases} \qquad \textbf{(8.10)}$$

avec :

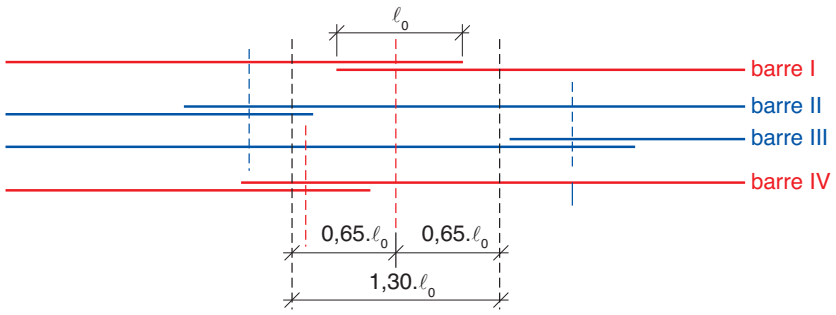
α_1, α_2, α_3, α_4 et α_5 comme pour les ancrages droits (voir § 3.8) en prenant ici :

$$\sum A_{st,\,min} = A_s \frac{\sigma_{sd}}{f_{yd}}$$

où A_s = aire de la section d'une des barres comportant un recouvrement (voir § 7.1.3 pour $\sum A_{st}$ ou remarque du § 3.8 si les coutures des recouvrements ne sont pas imposées),

$$\alpha_6 = \sqrt{\frac{\rho_1}{25}} \in [1\,;1,5]$$

où ρ_1 = pourcentage de barres avec recouvrements dont l'axe se situe dans la plage d'amplitude $\pm\ 0,65.l_0$ par rapport à l'axe du recouvrement considéré :



42. EC 2 – 8.7.3 (1)

Dans cet exemple, les barres II et III sont en dehors de la zone considérée et :

$$\rho_1 = \frac{2}{4} = 50\,\% \quad \Rightarrow \quad \alpha_6 = \sqrt{\frac{50}{25}} = 1,41$$

$$l_{0,\,min} = \text{Max}\begin{cases} 0,3.\alpha_6.l_{b,\,rqd} \\ 15.\phi \\ 200\ \text{mm} \end{cases} \qquad \textbf{(8.11)}$$

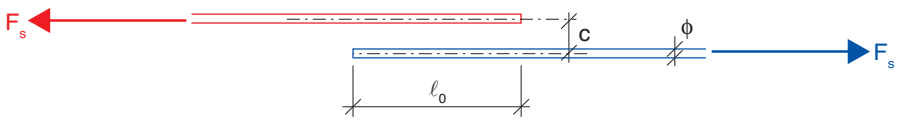
Remarque

Si les barres en recouvrement ont des diamètres différents, la longueur de recouvrement l_0 doit être évaluée à partir de la plus grande longueur d'ancrage de référence $l_{b,\,rqd}$.

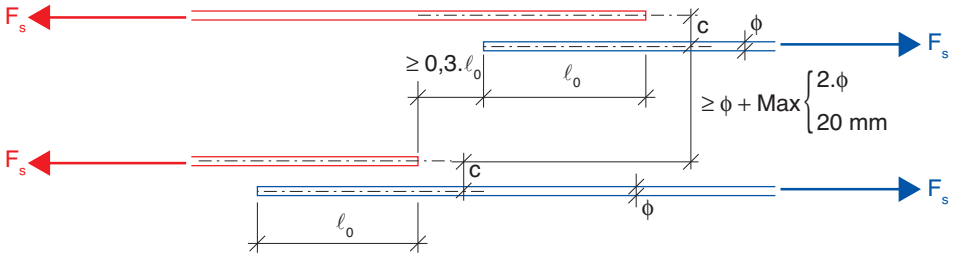
Dispositions constructives[43] :

$$c - \phi \le \text{Min}\begin{cases} 50\ \text{mm} \\ 4.\phi \end{cases}, \text{ sinon augmenter } l_0 \text{ de } (c - \phi).$$

- recouvrement isolé :



- recouvrements voisins :



Proportions maximales de barres en recouvrement[44] :

- 100 % : barres tendues situées dans un même lit ;
- 50 % : barres tendues disposées en plusieurs lits ;
- 100 % : barres comprimées et armatures de répartition.

43. EC 2 – 8.7.2 (3)
44. EC 2 – 8.7.2 (4)

7.1.3 Couture des recouvrements

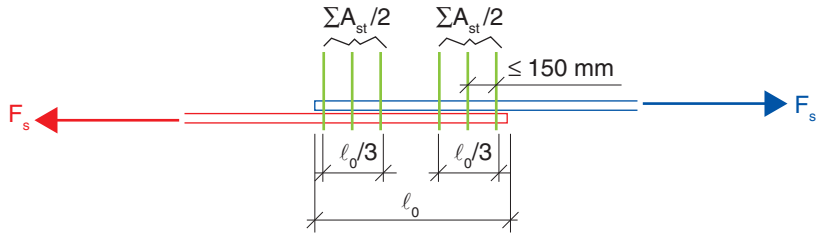
Les plans des recouvrements doivent être cousus par des armatures transversales[45].

Il n'est pas nécessaire de prévoir des armatures transversales spécifiques au recouvrement (autres que celles prévues pour d'autres raisons comme les armatures d'âme ou de répartition) :

- si $\phi < 20$ mm ;
- ou si la proportion des barres en recouvrement est inférieure à 25 %.

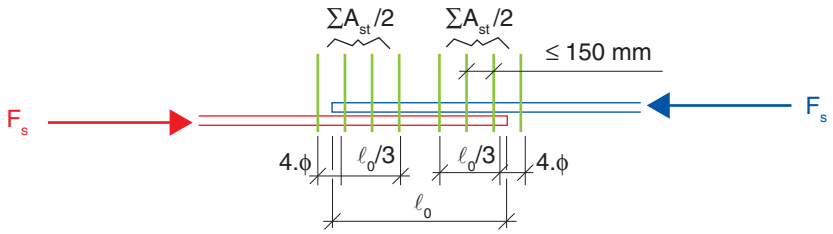
Dans le cas où $\phi \geq 20$ mm, les dispositions à respecter sont les suivantes :

- pour les barres tendues :



$\boxed{\sum A_{st} \geq A_s}$ avec : A_s = section d'une barre en recouvrement,

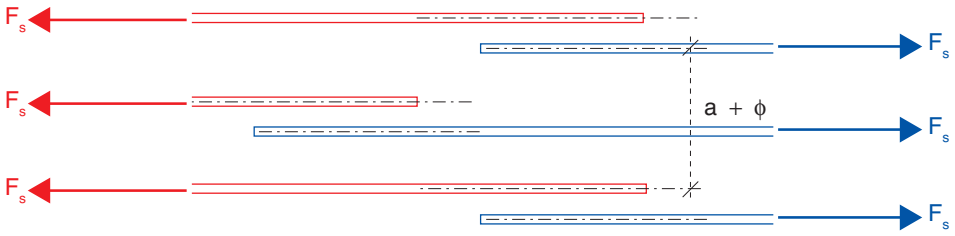
- pour les barres toujours comprimées[46] :



$\boxed{\sum A_{st} \geq A_s}$ avec : A_s = section d'une barre en recouvrement

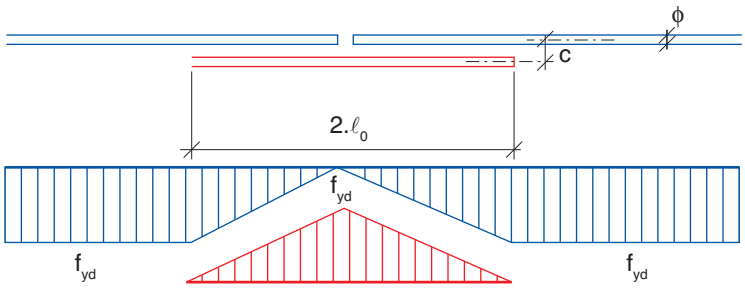
Dans une section donnée, si plus de 50 % des barres sont en recouvrement et si la distance a entre recouvrements adjascents est au plus égale à $10.\phi$, il convient d'utiliser comme armatures transversales des cadres, étriers ou épingles ancrés dans la section[47] :

45. EC 2 – 8.7.4.1
46. EC 2 – 8.7.4.2
47. EC 2 – 8.7.4.1 (3)



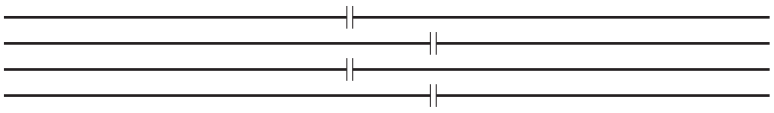
7.1.4 Barres couvre-joints – Jonctions par chaînage

Les barres couvre-joints sont utilisées pour transmettre les efforts entre deux barres situées dans le prolongement l'une de l'autre. Leur longueur est au moins égale à $2.l_0$.



$$c - \phi \leq \text{Min}\begin{cases} 50\ \text{mm} \\ 4.\phi \end{cases}, \text{ sinon, augmenter } l_0 \text{ de } (c - \phi).$$

Si le nombre de barres est élevé, les barres couvre-joints deviennent continues et ne se distinguent plus des autres barres. On a un « chaînage ».



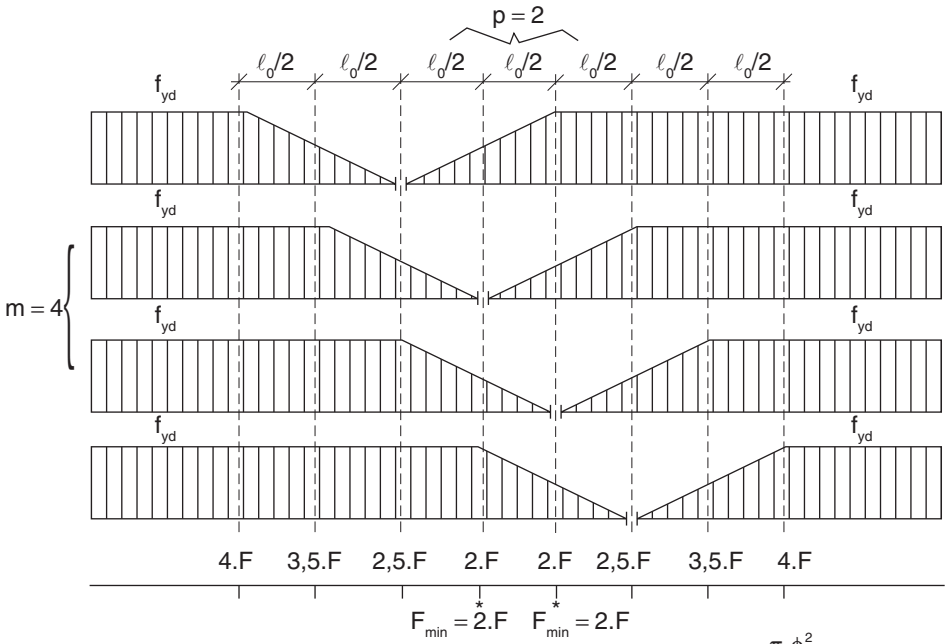
Règle

Un chaînage de m barres de même diamètre comportant p coupures par longueur de recouvrement est mécaniquement équivalent à (m – p) barres continues. Par exemple, pour :

– m = 4 barres,

– p = 2 coupures par longueur de recouvrement,

le nombre de barres utiles est de 2.



Efforts développés par les barres en présence ($F = \frac{\pi.\phi^2}{4} f_{yd}$)

Pour l'espacement horizontal de ces barres, voir § 7.1.2.

Pour les armatures de couture, voir § 7.1.3.

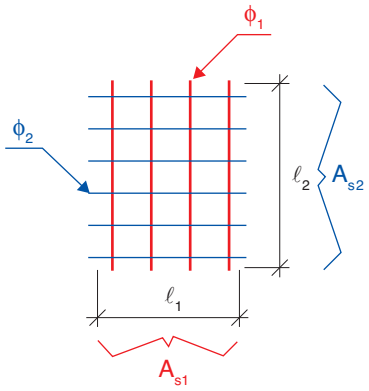
7.2 Ancrages et recouvrement des treillis soudés

7.2.1 Définition

Quel que soit leur diamètre, sont considérés conventionnellement[48] :

- comme fils porteurs, ceux qui engendrent une section par mètre supérieure ou égale à celle engendrée par les fils qui leur sont perpendiculaires ;
- comme fils de répartition, même si leur diamètre est le plus grand, ceux qui engendrent une section par mètre inférieure à celle engendrée par les fils qui leur sont perpendiculaires.

48. ADETS



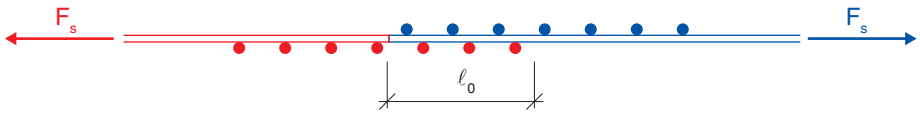
Si $A_{s1}/l_1 \geq A_{s2}/l_2$, même si $\phi_1 < \phi_2$:

- A_{s1} = fils porteurs ;
- A_{s2} = fils de répartition.

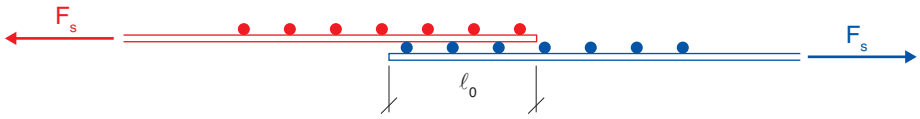
7.2.2 Dispositions des recouvrements

On distingue les deux possibilités suivantes[49] :

- recouvrement des panneaux dans un même plan :



- recouvrement des panneaux dans des plans distincts :



Dans les deux cas, aucune armature transversale n'est nécessaire dans la zone de recouvrement[50].

49. EC 2 – 8.7.5.1 (1)
50. EC 2 – 8.7.5.1 (7)

7.2.2.1 Recouvrement des armatures principales des panneaux dans un même plan

Cette disposition est recommandée dans le cas des charges de fatigue[51].

Les dispositions des recouvrements des barres isolées du § 7.1.2 s'appliquent en négligeant l'effet favorable des barres transversales, donc en prenant[52] $\alpha_3 = 1$.

7.2.2.2 Recouvrement des armatures principales des panneaux dans des plans distincts

Proportion admissible d'armatures principales à ancrer[53] :

- 100 % si $\left(A_s / s\right)_{prov} \leq 1\,200\ mm^2 / m$;
- 60 % si $\left(A_s / s\right)_{prov} > 1\,200\ mm^2 / m$;

avec :

$\left(A_s / s\right)_{prov}$ = aire de la section d'aciers par unité de longueur,

s = espacement des fils.

Il convient de décaler au minimum de $1,3.l_0$ les jonctions des différents panneaux.

Disposer les recouvrements des armatures principales dans les zones où la contrainte de l'acier tendu vérifie à l'ELU[54] :

$\sigma_s \leq 0,8.f_{yd}$

Dans le cas contraire :

- prendre comme hauteur utile du ferraillage, celle du lit le plus éloigné de la face tendue (par sécurité) ;
- vérifier l'ouverture des fissures à proximité de l'extrémité du recouvrement en majorant de 25 % la contrainte de l'acier à utiliser (voir § 5.2.1 et 5.2.2, chapitre 14 : « ELS de fissuration »).

7.2.2.3 Recouvrement des armatures de répartition (fils de répartition[55])

Longueur de recouvrement :

	Diamètre des fils de répartition (mm)		
	$\phi \leq 6$	$6 < \phi \leq 8,5$	$8,5 < \phi \leq 12$
Longueur de recouvrement	$\text{Max}\begin{cases} s_1 \\ 150\ mm \end{cases}$	$\text{Max}\begin{cases} 2.s_1 \\ 250\ mm \end{cases}$	$\text{Max}\begin{cases} 2.s_1 \\ 350\ mm \end{cases}$

s_1 = longueur d'une maille entre 2 soudures (soudures extrêmes comprises).

51. EC 2 – 8.7.5.1 (2)
52. EC 2 – 8.7.5.1 (3)
53. EC 2 – 8.7.5.1 (6)
54. EC 2 – 8.7.5.1 (4) & (5)
55. EC 2 – 8.7.5.2

Pourcentage admissible d'armatures de répartition en recouvrement : 100 %.

La longueur de recouvrement l_0, calculée comme indiqué au § 7.1.2, doit recouper au moins deux armatures principales.

8. Paquets de barres

8.1 Généralités

Les paquets de barres sont constitués[56] :

- de deux barres disposées l'une à côté de l'autre dans un même plan horizontal (sinon les barres sont considérées comme des barres isolées) ;
- de trois ou quatre barres ;
- de barres de mêmes caractéristiques (type et nuance) ;
- avec un rapport des diamètres des barres constitutives du paquet au plus égal à 1,7.

L'enrobage et les espacements sont comptés à partir du contour effectif du paquet de barres[57].

Les règles pour les barres individuelles s'appliquent en remplaçant le paquet de barres par une barre fictive équivalente de diamètre fictif équivalent tel que :

$$\pi\frac{\phi_n^2}{4} = n_b\pi\frac{\phi^2}{4} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\phi_n = \phi\sqrt{n_b} \leq 55 \text{ mm}}^{58} \qquad \textbf{(8.14)}$$

avec : n_b = nombre de barres du paquet :

$n_b \leq 4$: barres verticales comprimées ou jonction par recouvrement,

$n_b \leq 3$: autres cas.

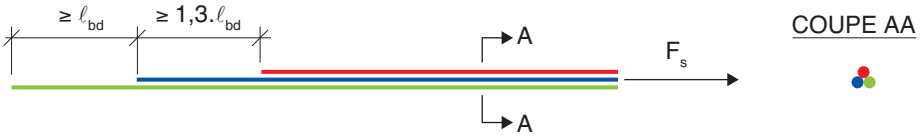
8.2 Ancrages des paquets de barres

Les paquets de barres tendues peuvent être arrêtés au droit des appuis d'extrémité et des appuis intermédiaires[59] :

$\phi_n < 32$ mm : arrêt au voisinage de l'appui sans décalage des arrêts de barres ;

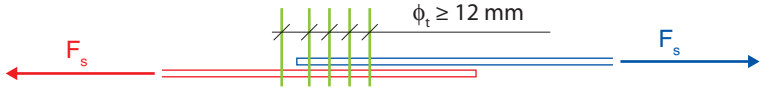
56. EC 2 – 8.9.1 (1) & (4)
57. EC 2 – 8.9.1 (3)
58. EC 2 – 8.9.1 (2) & (3)
59. EC 2 – 8.9.2 (1)

$\phi_n \geq 32$ mm : décalage des arrêts de barres longitudinalement comme indiqué sur la figure ci-dessous :



l_{bd} calculé avec ϕ si le décalage est supérieur à $1,3.l_{b,\,rqd}$ (calculé avec ϕ) ou avec ϕ_n dans le cas contraire.

Les paquets de barres comprimés peuvent être arrêtés sans décalage. Dans le cas où $\phi_n \geq 32$ mm, prévoir aux extrémités du paquet au moins quatre cours d'armatures transversales de diamètre $\phi_t \geq 12$ mm et un cours supplémentaire hors recouvrement, disposés comme suit :



8.3 Recouvrement des paquets de barres[60]

8.3.1 Cas des paquets de deux barres avec $\phi_n < 32$ mm

Recouvrement sans décalage des arrêts de barres.

l_0 est calculé avec le diamètre équivalent ϕ_n.

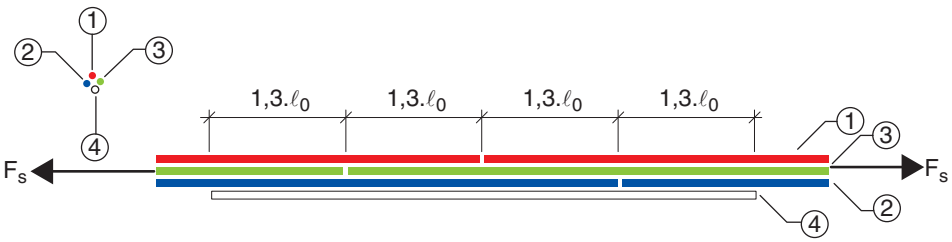
8.3.2 Autres cas

l_0 est calculé avec le diamètre d'une barre unique : ϕ.

Décalage des arrêts de barres d'au moins $1,3.l_0$.

Une quatrième barre peut être utilisée comme barre de recouvrement.

Il ne doit pas y avoir plus de quatre barres dans une section de recouvrement.



60. EC 2 – 8.9.3

9. Règles supplémentaires pour les barres de gros diamètre[61]

Il s'agit de barres de diamètre tel que $\phi > \phi_{large} = 32$ mm (valeur recommandée) et 40 mm (valeur à utiliser pour l'Annexe nationale française[62]).

L'ancrage de ces barres est réalisé au moyen d'organes mécaniques spécifiques. En cas d'ancrage droit, il convient de confiner ces armatures au moyen de cadres ou d'étriers qui s'ajoutent aux armatures d'effort tranchant et telles que :

- dans la direction parallèle à la face tendue :

$$A_{sh} = \frac{1}{4} A_s . n_1 \qquad \textbf{(8.12)}$$

avec :

A_s = aire de la section de l'armature ancrée,

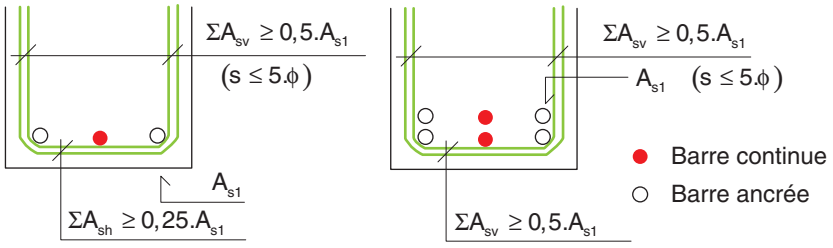
n_1 = nombre de lits comportant des barres ancrées dans la même section de l'élément,

- dans la direction orthogonale à la face tendue :

$$A_{sv} = \frac{1}{4} A_s . n_2 \qquad \textbf{(8.13)}$$

avec :

n_2 = nombre de barres ancrées dans chaque lit.



$n_1 = 1$ et $n_2 = 2$ $\qquad$ $n_1 = 2$ et $n_2 = 2$

Ne pas prévoir de jonctions par recouvrement[63] :

- dans les sections de dimensions supérieures à 1,00 m ;
- ou lorsque la contrainte dans les barres dépasse 80 % de la résistance ultime de calcul.

61. EC 2 – 8.8
62. EC 2 – voir AN
63. EC 2 – 8.8.(4)

La maîtrise de la fissuration peut être obtenue :

- soit par l'utilisation d'armatures de peau (voir § 10) en retenant :
  - $A_{s,\ surf} \geq 0,01.A_{ct,\ ext}$ dans la direction perpendiculaire aux barres de gros diamètre ;
  - $A_{s,\ surf} \geq 0,02.A_{ct,\ ext}$ dans la direction parallèle à ces barres ;
- soit par le calcul (voir chapitre 14 : « ELS de fissuration »).

10. Armatures de peau[64]

10.1 Utilité

Pour les poutres de grande hauteur, ou pour des barres (ou de paquets de barres) de gros diamètre (voir § 9), des armatures de peau sont nécessaires pour :

- contrôler la fissuration ;
- garantir une bonne résistance vis-à-vis des risques d'épaufrure du béton d'enrobage.

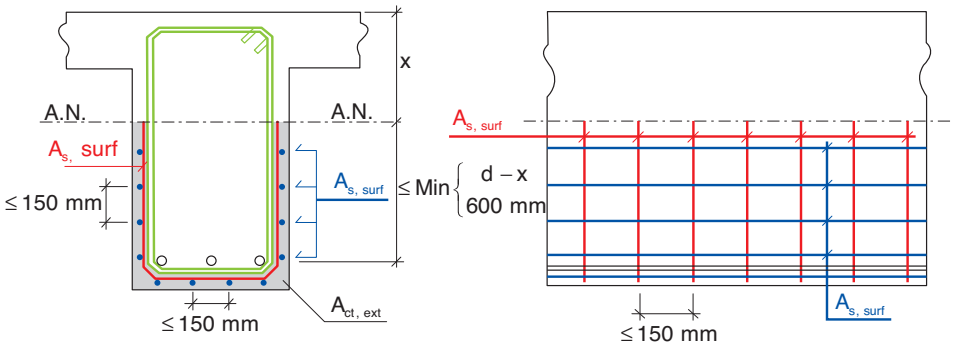
10.2 Constitution

Les armatures de peau sont constituées :

- de treillis soudés ;
- ou de barres HA de faible diamètre, placées à l'extérieur des cadres.

10.3 Sections et tracés

Dispositions[65] :



64. EC 2 – 9.2.4
65. EC 2 – annexe J

Section dans les deux directions (orthogonale et parallèle aux aciers tendus) :

$\boxed{A_{s,\ surf} \geq 0,01.A_{ct,\ ext}}$: valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[66],

avec :

$A_{s,\ surf}$ = section des armatures de peau (dans chaque direction),

$A_{ct,\ ext}$ = aire du béton tendu à l'extérieur des cadres.

Les armatures de peau peuvent être incorporées dans le ferraillage de flexion et d'effort tranchant sous réserve qu'elles satisfassent aux conditions de mise en œuvre et d'ancrage de ces dernières.

Les règles d'enrobage des § 2.1 et 2.2 doivent être respectées pour les armatures de peau. Quand l'enrobage des armatures est supérieur à 70 mm, pour une durabilité accrue, il convient d'utiliser un ferraillage de peau avec :

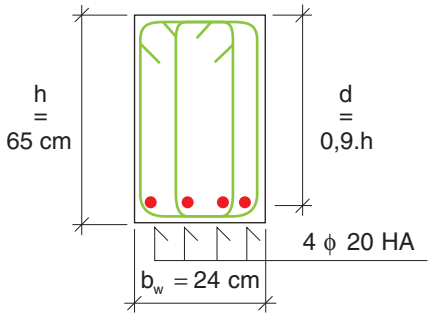
$\boxed{A_{s,\ surf} \geq 0,005.A_{ct,\ ext}}$ dans chaque direction.

66. EC 2 – voir AN

II. APPLICATIONS

Application n° 1 : enrobages

–Énoncé–



On considère la section droite rectangulaire figurée ci-contre.

Classe structurale : S4.

Classe d'environnement : XC2.

Granulats : d_g = 25 mm.

Armatures transversales : ϕ_t = 8 mm.

On se propose :

1/ de déterminer l'enrobage des armatures inférieures,

2/ de calculer les distances minimales entre barres,

3/ de vérifier :

- la hauteur utile (distance entre le centre de gravité des armatures inférieures tendues et la fibre de béton la plus comprimée) ;
- la largeur de la section.

–Corrigé–

1. Conditions d'enrobage

1.1 Enrobage minimal

Enrobage :

$$c_{min} = \text{Max} \begin{cases} c_{min,\ b}, \\ c_{min,\ dur} + \Delta c_{dur,\ \gamma} - \Delta c_{dur,\ st} - \Delta c_{dur,\ add}, \\ 10 \text{ mm}. \end{cases}$$

$c_{min,\ b}$ requis vis-à-vis de l'adhérence :

- barres individuelles $c_{min,\ b} = \phi = 20$ mm

$c_{min,\ dur}$ requis vis-à-vis des conditions d'environnement :

- classe structurale, classe d'environnement $\Rightarrow$ $c_{min,\ dur}$

• classe structurale : S4
  classe d'environnement : XC2 $\Rightarrow \quad c_{min,\ dur} = 25$ mm

Marge de sécurité :

• $\Delta c_{dur,\ \gamma}$ $\Delta c_{dur,\ \gamma} = 0$ mm (valeur recommandée)

Enrobage minimal dans le cas d'acier inoxydable :

• aciers normaux $\Delta c_{dur,\ st} = 0$ mm (valeur recommandée)

Enrobage minimal dans le cas de protection supplémentaire :

• pas de protection particulière $\Delta c_{dur,\ add} = 0$ mm (valeur recommandée)

Total :

$$c_{min} = 25 \text{ mm} = \text{Max} \begin{cases} 20 \text{ mm} \\ 25 + 0 - 0 - 0 = 25 \text{ mm} \\ 10 \text{ mm.} \end{cases}$$

1.2 Enrobage nominal

Marge pour tolérances d'exécution :

• Δc_{dev} $\Delta c_{dev} = 10$ mm

Enrobage nominal :

$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$ $c_{nom} = 25 + 10 = 35$ mm

$\Rightarrow \quad c_{nom} = 35$ mm

2. Distances minimales entre barres

Distance libre horizontale ou verticale :

$$a \geq \text{Max} \begin{cases} k_1.\phi \\ 20 \text{ mm} \\ d_g + k_2 \text{ mm} \end{cases}$$

avec :

$k_1 = 1$ et $k_2 = 5$ mm : valeurs recommandées

$$a \geq 30 \text{ mm} = \text{Max} \begin{cases} 1.20 = 20 \text{ mm} \\ 20 \text{ mm} \\ 25 + 5 = 30 \text{ mm} \end{cases}$$

$\Rightarrow \quad \boxed{a \geq 30 \text{ mm}}$

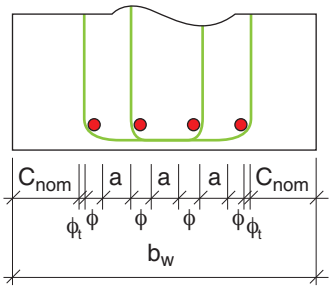
3. Vérifications

3.1 Hauteur utile

$$d = h - c_{nom} - \phi_t - \frac{\phi}{2} \qquad d = 65 - 3,5 - 0,8 - \frac{2,0}{2} = 59,7 \text{ cm}$$

$$d >< 0,9.h \qquad d = 59,7 \text{ cm} > 58,5 \text{ cm} = 0,9.65 = 0,9.h \text{ O.K.}$$

3.2 Distances entre barres

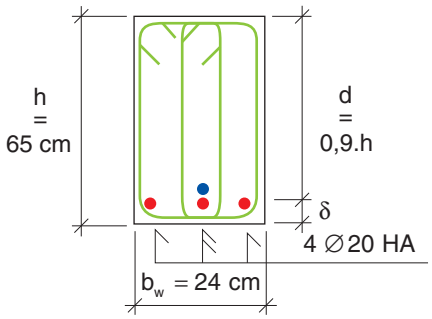


$$b_w >< 2.c_{nom} + 2.\phi_t + 4.\phi + 3.a$$

$$\boxed{b_w = 240 \text{ mm} < 256 \text{ mm} = 2.35 + 2.8 + 4.20 + 3.30}$$

⇒ nécessité de changer la disposition des armatures inférieures.

⇒ Prenons 3 files verticales :



$$h - d = \delta = \frac{3\left(3,5 + 0,8 + \frac{2,0}{2}\right) + \left(3,5 + 0,8 + 2,0 + \frac{2,0}{2}\right)}{4}$$

$h - d = \delta = 5{,}8$ cm

$d = h - \delta$ $\quad d = 65 - 5{,}8 = 59{,}2$ cm

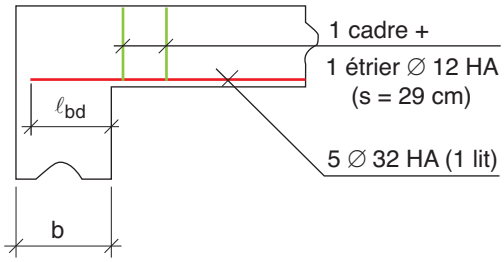
$d >< 0{,}9.h$ $\quad \boxed{d = 59{,}2 \text{ cm} > 58{,}5 \text{ cm} = 0{,}9.65 = 0{,}9.h \text{ O.K.}}$

$b_w >< 2.c_{nom} + 2.\phi_t + 3.\phi + 2.a$

$\boxed{b_w = 240 \text{ mm} > 206 \text{ mm} = 2.35 + 2.8 + 3.20 + 2.30 \text{ O.K.}}$

Application n° 2 : longueur d'ancrage

–Énoncé–



On considère l'ancrage de trois des 5 ϕ 32 HA inférieurs sur appui de la poutre de section :

- $b_w = 35$ cm,
- $h = 170$ cm,

figurée ci-contre.

Béton : $f_{ck} = 25$ MPa.

Contrainte des armatures longitudinales à l'origine de l'ancrage : $\sigma_{sd} = 409$ MPa.

Enrobage des armatures longitudinales inférieures : $c_{nom} = 3$ cm.

On se propose de calculer la longueur d'ancrage nécessaire pour les armatures longitudinales inférieures arrêtées sans crochets d'extrémité.

–Corrigé–

1. Caractéristiques des matériaux

$f_{ck} \leq 50$ MPa $\Rightarrow$ $f_{ctm} = 0{,}3\left[f_{ck}\right]^{2/3}$ $\quad f_{ctm} = 0{,}3\left[25\right]^{2/3} = 2{,}56$ MPa

$f_{ctk,\ 0{,}05} = 0{,}7.f_{ctm}$ $\quad f_{ctk,\ 0{,}05} = 0{,}7.2{,}56 = 1{,}79$ MPa

2. Contrainte ultime d'adhérence

$f_{bd} = 2,25.\eta_1.\eta_2.f_{ctd}$

avec :

$\eta_1 = \begin{cases} 1 : \text{bonnes conditions d'adhérence,} \\ 0,7 : \text{conditions d'adhérence médiocres,} \end{cases}$

h = 170 cm > 600 mm et armatures inférieures ⇒ bonnes conditions d'enrobage ⇒ $\eta_1 = 1$

$\eta_2 = \begin{cases} 1 : \phi \le 32 \text{ mm,} \\ \dfrac{132 - \phi}{100} : \phi > 32 \text{ mm.} \end{cases}$ $\phi \le 32$ mm ⇒ $\eta_2 = 1$

$f_{ctd} = \dfrac{f_{ctk,\ 0,05}}{\gamma_c}$ $f_{ctd} = 1\dfrac{1,79}{1,5} = 1,19$ MPa

avec $f_{ctk,\ 0,05} \le 3,1$ MPa $f_{bd} = 2,25.1.1.1,19 = 2,68$ MPa

3. Longueur d'ancrage de référence

$l_{b,\ rqd} = \dfrac{\phi}{4}.\dfrac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$ $l_{b,\ rqd} = \dfrac{\phi}{4}.\dfrac{409}{2,68} = 38,15.\phi$

4. Longueur d'ancrage de calcul

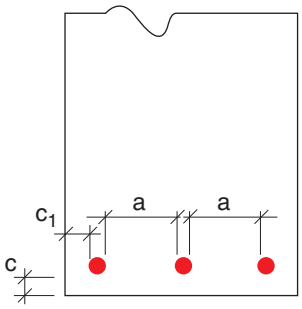
4.1 Longueur d'ancrage calculée

$l_{bd} = \text{Max} \begin{cases} \alpha_1.\alpha_2.\alpha_3.\alpha_4.\alpha_5.l_{b,\ rqd} \\ 0,7.\alpha_1.\alpha_4.l_{b,\ rqd} \end{cases} \ge l_{b,\ min}$

avec :

α_1, fonction de la forme des barres : barres droites tendues ⇒ $\alpha_1 = 1$

$\alpha_2 = 1 - 0,15\dfrac{c_d - \phi}{\phi} \in [0,7 ; 1]$, fonction des conditions d'enrobage



où :

$$c_d = \text{Min}\begin{cases}\frac{a}{2}\\ c_1\\ c\end{cases} \qquad c_d = 4{,}2\text{ cm} = \text{Min}\begin{cases}\frac{35-2.3-2.1{,}2-3.3{,}2}{2} = 8{,}5\text{ cm}\\ 3+1{,}2 = 4{,}2\text{ cm}\\ 3+1{,}2 = 4{,}2\text{ cm}\end{cases}$$

$$\alpha_2 = 1 - 0{,}15\frac{4{,}2-3{,}2}{3{,}2} = 0{,}95 \in [0{,}7\,;1]$$

$\alpha_3 = 1 - K.\lambda \in [0{,}7\,;1]$, fonction des armatures transversales

où :

K, fonction de la position relative des armatures longitudinales et transversales :

A_s dans l'angle d'un cadre transversal

$\Rightarrow$ K = 0,1

$$\lambda = \frac{\sum A_{st} - \sum A_{st,\,min}}{A_s}$$

$\sum A_{st}$ = aire des armatures transversales sur l_{bd} : $\sum A_{st}$ inconnu à ce stade de l'étude

A_s = aire de la section d'une barre ancrée : $A_s = 8{,}04\text{ cm}^2$ (1 ϕ 32 HA)

$$\sum A_{st,\,min} = \begin{cases}0{,}25.A_s : \text{poutres},\\ 0 : \text{dalles},\end{cases} \qquad \sum A_{st,\,min} = 0{,}25.8{,}04 = 2{,}01\text{ cm}^2$$

$\alpha_3 = 1$ par sécurité

α_4, fonction du confinement par des armatures transversales soudées : armatures sans soudure $\Rightarrow \alpha_4 = 1$

$\alpha_5 = 1 - 0,04.p \in [0,7\,;1]$, fonction des conditions de pression transversales : $p = 0 \Rightarrow \alpha_5 = 1$

$$l_{bd} = 115,97 \text{ cm} = \text{Max}\begin{cases} 1.0,95.1.1.1.38,15.\phi = 36,24.\phi = 36,24.3,2 = 115,97 \text{ cm} \\ 0,7.1.1.38,15.\phi = 26,71.\phi = 26,71.3,2 = 85,47 \text{ cm} \end{cases}$$

4.2 Remarque sur le coefficient α_3

En choisissant α_3 $\alpha_3 = 0,7$ (valeur minimale)

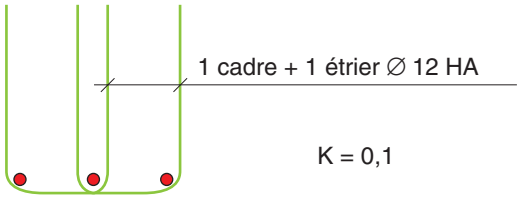
$$\sum A_{st} = \frac{1-\alpha_3}{K} A_s + \sum A_{st,\,min}$$

avec :

A_s = aire de la barre ancrée : $A_s = 8,04 \text{ cm}^2$ (1 ϕ 32 HA)

$$\sum A_{st,\,min} = \begin{cases} 0,25.A_s : \text{poutres}, \\ 0 : \text{dalles}, \end{cases} \qquad \sum A_{st,\,min} = 0,25.8,04 = 2,01 \text{ cm}^2$$

$$K = \begin{cases} 0,1 : A_s \text{ dans l'angle d'une armature transversale}, \\ 0,05 : A_s \text{ sur la face intérieure d'une armature transversale}, \\ 0,00 : \text{autres cas}, \end{cases}$$



$$\sum A_{st} = \frac{1-0,7}{0,1} 8,04 + 2,01 = 26,13 \text{ cm}^2$$

D'où l'espacement des cadres et étriers ϕ 12 HA :

A_{st} = aire d'un cours d'armatures transversales : $A_{st} = 4.1,13 = 4,52 \text{ cm}^2$

s = espacement de ces armatures le long de l_{bd},

$l_0 = l_{bd}$ calculée avec la valeur de α_3 que l'on s'est donnée : $l_0 = 0,7.115,97 = 81,18$ cm

on obtient :

$$\frac{A_{st}}{s} = \frac{\sum A_{st}}{l_0} \Rightarrow s = l_0 \frac{A_{st}}{\sum A_{st}} \qquad s = 81{,}18 \frac{4{,}52}{26{,}13} = 14{,}04 \text{ cm}$$

Cet espacement étant faible vis-à-vis de l'espacement des armatures d'âme au voisinage de l'appui (s = 29 cm), nous allons augmenter α_3, ce qui conduira à réduire $\sum A_{st}$ et, par conséquent, à augmenter l'espacement s des armatures d'âme. D'où le tableau :

α_3 (u)	$\sum A_{st}$ (cm²)	$l_0 = l_{bd}(\alpha_3)$ (cm)	s (cm)
0,8	18,09	92,78	23,18
0,85	14,07	98,57	31,67
0,9	10,05	104,37	46,94
0,84	14,87	97,41	29,60

Pour conserver le même espacement que pour les armatures d'âme au voisinage de l'appui (s = 29 cm), nous prendrons :

$$l_b = \text{Max}\begin{cases} l_{bd}(\alpha_3 = 0{,}84) = 97{,}41 \text{ cm} \\ l_{b,\,min} \end{cases}$$

4.3 Longueur d'ancrage retenue

Barres tendues : $l_{b,\,min} = \text{Max}\begin{cases} 0{,}3.l_{b,\,rqd} \\ 10.\phi \\ 100 \text{ mm} \end{cases}$

$$l_{b,\,min} = 37 \text{ cm} = \text{Max}\begin{cases} 0{,}3.38{,}15.3{,}2 = 36{,}62 \text{ cm} \\ 10.3{,}2 = 32 \text{ cm} \\ 10 \text{ cm} \end{cases}$$

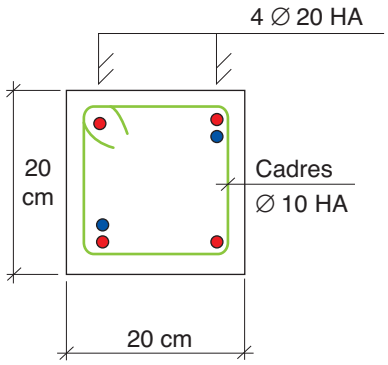
$$l_b = \text{Max}\begin{cases} l_{bd}(\alpha_3 = 0{,}84) \\ l_{b,\,min} \end{cases} \qquad l_b = 97{,}41 \text{ cm} = \text{Max}\begin{cases} 97{,}41 \text{ cm} \\ 37 \text{ cm} \end{cases}$$

$l_{bd} = 100$ cm

avec : **1 cadre + 1 étrier ϕ 12 HA : s = 29 cm sur l_{bd}**

Application n° 3 : longueur de recouvrement

–Énoncé–



Dans le tirant carré de 20 cm de côté figuré ci-contre, on s'intéresse aux recouvrements des armatures longitudinales (ϕ 20 HA). Ces recouvrements sont décalés de l_0 .

Béton : $f_{ck} = 25$ MPa.

Aciers S 500 : $f_{yd} = 435$ MPa.

Contrainte des armatures longitudinales : $\sigma_{sd} = 442$ MPa.

Enrobage : $c_{nom} = 3$ cm.

On se propose de calculer la longueur de recouvrement nécessaire pour les armatures longitudinales.

–Corrigé–

1. Caractéristiques des matériaux

$f_{ck} \leq 50$ MPa $\Rightarrow$ $f_{ctm} = 0,3\left[f_{ck}\right]^{2/3}$ $f_{ctm} = 0,3\left[25\right]^{2/3} = 2,56$ MPa

$f_{ctk,\,0,05} = 0,7.f_{ctm}$ $f_{ctk,\,0,05} = 0,7.2,56 = 1,79$ MPa

2. Contrainte ultime d'adhérence

$f_{bd} = 2,25.\eta_1.\eta_2.f_{ctd}$

avec :

$$\eta_1 = \begin{cases} 1 : \text{bonnes conditions d'adhérence,} \\ 0,7 : \text{conditions d'adhérence médiocres,} \end{cases}$$

armatures horizontales et h = 20 cm < 250 mm $\Rightarrow$ bonnes conditions d'enrobage $\Rightarrow$ $\eta_1 = 1$

$$\eta_2 = \begin{cases} 1 : \phi \leq 32 \text{ mm,} \\ \dfrac{132 - \phi}{100} : \phi > 32 \text{ mm.} \end{cases}$$

$\phi = 20$ mm < 32 mm $\Rightarrow$ $\eta_2 = 1$

$f_{ctd} = \dfrac{f_{ctk,\ 0,05}}{\gamma_c}$ $\qquad$ $f_{ctd} = 1\dfrac{1,79}{1,5} = 1,19$ MPa

avec $f_{ctk,\ 0,05} \leq 3,1$ MPa $\qquad$ $f_{bd} = 2,25.1.1.1,19 = 2,68$ MPa

3. Longueur d'ancrage de référence

$l_{b,\ rqd} = \dfrac{\phi}{4} \cdot \dfrac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$ $\qquad$ $l_{b,\ rqd} = \dfrac{\phi}{4} \cdot \dfrac{442}{2,68} = 41,23.\phi$

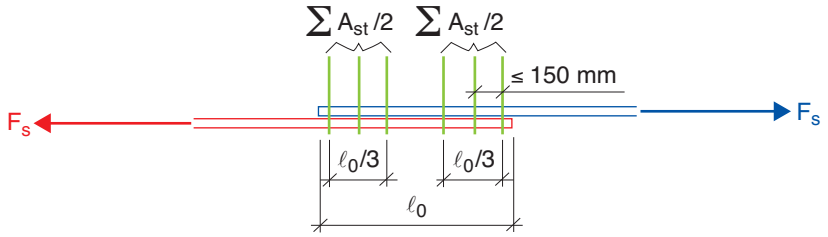
4. Longueur de recouvrement de calcul

Recouvrements décalés de $l_0 \Rightarrow \rho_l = \dfrac{1}{4}$

Pas d'armatures transversales spécifiques si :

$\begin{cases} \phi < 20 \text{ mm} \\ \rho_l < 0,25 \end{cases}$

$\begin{cases} \phi = 20 \text{ mm} \leq 20 \text{ mm} \\ \rho_l = 0,25 \leq 0,25 \end{cases} \Rightarrow$ armatures transversales spécifiques sur le recouvrement.



$\sum A_{st} \geq A_s$

avec : A_s = section d'une barre en recouvrement :

$1\ \phi\ 20$ HA $\Rightarrow \sum A_{st} \geq 3,14\ cm^2$

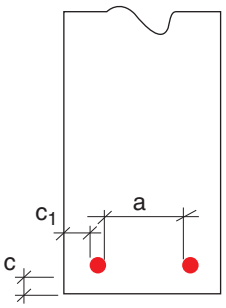
4.1 Longueur de recouvrement calculée

$$l_0 = \text{Max} \begin{cases} \alpha_1.\alpha_2.\alpha_3.\alpha_4.\alpha_5.\alpha_6.l_{b,\ rqd} \\ 0,7.\alpha_1.\alpha_4.\alpha_6.l_{b,\ rqd} \\ l_{0,\ min} \end{cases}$$

avec :

α_1 , fonction de la forme des barres : barres droites tendues : $\Rightarrow \quad \alpha_1 = 1$

$\alpha_2 = 1 - 0{,}15\dfrac{c_d - \phi}{\phi} \in [0{,}7\,;1]$, fonction des conditions d'enrobage



où :

$c_1 = c = c_{nom} + \phi_t$

$$c_d = \text{Min}\begin{cases}\dfrac{a}{2}\\ c_1\\ c\end{cases} \qquad c_d = 4\text{ cm} = \text{Min}\begin{cases}\dfrac{20 - 2\,(3 + 1{,}0 + 2{,}0)}{2} = 4{,}0\text{ cm}\\ 3 + 1 = 4\text{ cm}\\ 3 + 1 = 4\text{ cm}\end{cases}$$

$$\alpha_2 = 1 - 0{,}15\frac{4{,}0 - 2{,}0}{2{,}0} = 0{,}85 \in [0{,}7\,;1] \Rightarrow \alpha_2 = 0{,}85$$

$\alpha_3 = 1 - K.\lambda \in [0{,}7\,;1]$, fonction des armatures transversales

où :

K, fonction de la position relative des armatures longitudinales et transversales :

A_s dans l'angle d'un cadre transversal

$\Rightarrow \quad K = 0{,}1$

$$\lambda = \frac{\sum A_{st} - \sum A_{st,\,min}}{A_s}$$

$\sum A_{st}$ = aire des armatures transversales le long de l_0 : $\sum A_{st} = 6.0{,}79 = 4{,}74\text{ cm}^2$ (2.3 cadres ϕ 10 HA)

A_s = aire de la section d'une des barres comportant un recouvrement : $A_s = 3{,}14\ cm^2$ (1 ϕ 20 HA)

$$\sum A_{st,\ min} = A_s \frac{\sigma_{sd}}{f_{yd}} \qquad \sum A_{st,\ min} = 3{,}14 \frac{442}{435} = 3{,}19\ cm^2$$

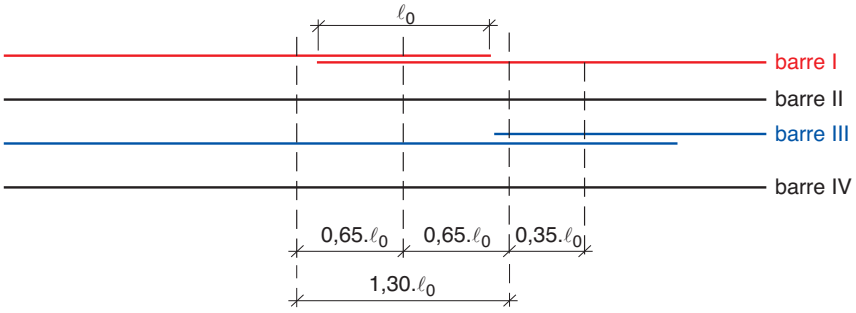
$$\lambda = \frac{4{,}74 - 3{,}19}{3{,}14} = 0{,}49$$

$$\alpha_3 = 1 - 0{,}1.0{,}49 = 0{,}95 \in [0{,}7\ ;\ 1]$$

α_4, fonction du confinement par des armatures transversales soudées : armatures sans soudure $\Rightarrow$ $\alpha_4 = 1$

$\alpha_5 = 1 - 0{,}04.p \in [0{,}7\ ;\ 1]$, fonction des conditions de pression transversales : $p = 0 \Rightarrow \alpha_5 = 1$

$\alpha_6 = \sqrt{\frac{\rho_1}{25}} \in [1\ ;\ 1{,}5]$ recouvrements décalés de l_0



Le recouvrement de la barre III n'intervient pas pour $\rho_1 \Rightarrow \rho_1 = \frac{1}{4} = 25\ \%$

$$\alpha_6 = \sqrt{\frac{25}{25}} = 1{,}00 \Rightarrow \alpha_6 = 1$$

$$l_0 = \text{Max} \begin{cases} 1.0{,}85.0{,}95.1.1.1.41{,}23.\phi = 33{,}29.\phi \\ 0{,}7.1.1.1.41{,}23.\phi = 28{,}86.\phi \end{cases}$$

$$l_0 = 33{,}29.2{,}0 = 66{,}58 \approx 67\ cm$$

4.2 Longueur de recouvrement retenue

$$\text{Barres tendues : } l_{0,\,min} = \text{Max}\begin{cases} 0{,}3.\alpha_6.l_{b,\,rqd} \\ 15.\phi \\ 200\ \text{mm} \end{cases}$$

$$l_{0,\,min} = 30\ \text{cm} = \text{Max}\begin{cases} 0{,}3.1.41{,}23.2{,}0 = 24{,}74\ \text{cm} \\ 15.2{,}0 = 30\ \text{cm} \\ 20\ \text{cm} \end{cases}$$

$l_0 = 67\ \text{cm} > l_{0,\,min} = 30\ \text{cm} \quad \Rightarrow \quad l_0 = 67\ \text{cm}$

avec : **2.3 cadres ϕ 10 HA sur l_0**

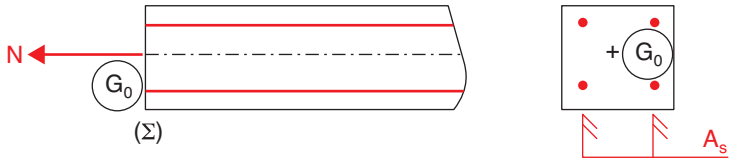
5 Traction simple

I. RAPPELS THÉORIQUES

1. Introduction

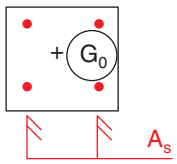
Une pièce en béton armé est sollicitée en traction simple lorsque les forces agissant à gauche d'une section droite Σ se réduisent au centre de gravité de la section à une force unique N (effort normal) perpendiculaire à Σ et dirigée vers la gauche.

Le béton tendu étant négligé, le centre de gravité de la section droite doit être confondu avec celui de la section des armatures.



2. Dimensionnement des armatures

2.1 Énoncé du problème



Données :

- A_c = aire de béton
- N_{Ed} = effort de traction à l'ELU
- N_{ser} = effort de traction à l'ELS

Inconnue :

- A_s = section d'aciers

2.2 Dimensionnement à l'ELU

En traction simple, la section est uniformément tendue.

En négligeant le béton tendu, les aciers équilibrent intégralement l'effort de traction N_{Ed} avec un allongement unitaire maximal égal à ε_{ud} ou à l'infini selon le type de diagramme contraintes-déformation des aciers utilisé.

Le diagramme contraintes-déformation des aciers donne (voir § 2.4.2.1, chapitre 3 : « Béton armé – Généralités ») :

- pour le diagramme à palier horizontal :

$$\sigma_{s,\,u} = f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad \text{avec :} \quad \gamma_s = \begin{cases} 1{,}00 \text{ pour les situations accidentelles,} \\ 1{,}15 \text{ dans les autres cas.} \end{cases}$$

- pour le diagramme à palier incliné :

$\sigma_{s,\,u} = g\left(\varepsilon_{ud}, k\dfrac{f_{yk}}{\gamma_s}\right) > f_{yd}$ donné en MPa par le tableau ci-dessous (voir § 2.4.2.1, chapitre 3 : « Béton armé – Généralités ») :

Classe / Acier	A	B	C
S 400	363	373	395
S 500	454	466	493

D'où la section d'armatures :

$$A_{s,\,u} = \frac{N_{Ed}}{\sigma_{s,\,u}} \qquad [5.1]$$

Il faut en outre $A_{s,\,u} \geq A_{s,\,min}$ (voir § 5).

2.3 Dimensionnement à l'ELS

2.3.1 Contraintes-limites des aciers tendus

Afin de respecter les exigences de durabilité et d'éviter une ouverture excessive des fissures, la contrainte de l'acier sous la combinaison caractéristique des charges est limitée à[1] :

$$\overline{\sigma_s} = k_3.f_{yk} \qquad [5.2]$$

1. EC 2 – 7.2 (5)

avec : $k_3 = 0,8$ valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[2].

Sous l'effet des seules déformations imposées, cette limite devient :

$$\boxed{\overline{\sigma_s} = k_4.f_{yk}} \qquad [5.3]$$

avec : $k_4 = 1$ valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[3].

2.3.2 Section d'armatures

Elle est obtenue par la relation :

$$\boxed{A_{s,\ ser} = \frac{N_{ser}}{\overline{\sigma_s}}} \qquad [5.4]$$

Il faut en outre $A_{s,\ ser} \geq A_{s,\ min}$ (voir § 5).

Dans le cas des aciers S 400 et S 500, on a toujours $A_{s,\ u} \geq A_{s,\ ser}$ et le calcul à l'ELS est inutile comme on peut le voir ci-après.

2.3.3 Remarque – État limite déterminant pour le calcul des armatures

En principe, il faudrait retenir :

$$A_s = \text{Max}\begin{cases} A_{s,\ u} \\ A_{s,\ ser} \end{cases} \qquad [5.5]$$

La section d'armatures tendue est déterminée à l'ELU lorsque :

$$A_{s,\ u} = \frac{N_{Ed}}{\sigma_{s,\ u}} > A_{s,\ ser} = \frac{N_{ser}}{\overline{\sigma_s}}$$

Soit, en posant $\gamma = \dfrac{N_{Ed}}{N_{ser}}$, lorsque :

$$\frac{N_{Ed}}{\sigma_{s,\ u}} > \frac{N_{Ed}}{\gamma.\overline{\sigma_s}} \quad \Rightarrow \quad \gamma.\overline{\sigma_s} > \sigma_{s,\ u}$$

Comme $1,35 \leq \gamma \leq 1,50$, $k_3 < k_4$ nous avons :

$$\gamma.\overline{\sigma_s} \geq 1,35.\overline{\sigma_s} \geq 1,35.0,8.f_{yk} > \sigma_{s,\ u}^{max} \geq \sigma_{s,\ u}$$

ce qui conduit aux valeurs suivantes :

---

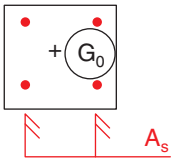
2. EC 2 – voir AN
3. EC 2 – voir AN

Acier	$1{,}35.0{,}8.f_{yk}$	><	$\sigma_{s,u}^{max}$	Observations
S 500	540 MPa	>	493 MPa	$\sigma_{s,u}^{max}$ correspond aux aciers de classe C (voir § 2.4.2.1, chapitre 3 : « Béton armé – Généralités »).
S 400	432 MPa	>	395 MPa	$\sigma_{s,u}^{max}$ correspond aux aciers de classe C (voir § 2.4.2.1, chapitre 3 : « Béton armé – Généralités »).

Il en résulte que, dans le cas des aciers S 500 et S 400, les aciers tendus sont toujours déterminés à l'ELU.

3. Vérification des contraintes

3.1 Données



$A_s = (m - p)\dfrac{\pi.\phi^2}{4}$ = section utile d'aciers,

m = nombre total de barres,

p = nombre de coupures par longueur de scellement droit,

A_c = section de béton,

N_{Ed} = effort de traction à l'ELU,

N_{ser} = effort de traction à l'ELS.

Avant tout calcul, il faut s'assurer que $A_s \geq A_{s,\,min}$ (voir § 5).

3.2 Vérification

À l'ELU : $\sigma_s = \dfrac{N_{Ed}}{A_s} \leq g\left(\varepsilon_{ud}, k\dfrac{f_{yk}}{\gamma_s}\right)$ ou f_{yd} (voir § 2.2).

À l'ELS : $\sigma_s = \dfrac{N_{ser}}{A_s} \leq \overline{\sigma_s}$ [5.6]

Remarque

À l'ELU : $\sigma_s = \dfrac{N_{Ed}}{A_s} \leq \sigma_{s,\,lim} = g\left(\varepsilon_{ud}, k\dfrac{f_{yk}}{\gamma_s}\right)$ ou f_{yd} (voir § 2.2).

À l'ELS : $\sigma_s = \dfrac{N_{ser}}{A_s} \leq \sigma_{s,\,lim} = \overline{\sigma_s}$

À l'ELS comme à l'ELU, on a l'équivalence :

$$\sigma_s = \frac{N}{A_s} \le \sigma_{s,\,lim} \Leftrightarrow N \le A_s.\sigma_{s,\,lim} \Leftrightarrow \frac{N}{\sigma_{s,\,lim}} \le A_s \qquad [5.7]$$

4. Détermination du coffrage

La section A_s d'aciers tendus est déterminée comme indiqué au § 2.

La section A_c de béton est obtenue en satisfaisant :

1/ la maîtrise de la fissuration (voir § 5) ;

2/ le bon enrobage des aciers ;

3/ les conditions de jonction par recouvrement des barres réalisant la section A_s d'aciers tendus.

5. Maîtrise de la fissuration

5.1 Cas où la maîtrise de la fissuration n'est pas requise

Dans ce cas, aucune section minimale d'armatures n'est requise. Néanmoins, par sécurité, il convient d'en prévoir une déterminée à partir du principe suivant[4] : la sollicitation provoquant la fissuration du béton $\left(\sigma_t = f_{ctm}\right)$ de la section supposée non armée et non fissurée doit entraîner dans les aciers tendus de la section réelle une contrainte au plus égale à f_{yk}

$$A_{s,\,min}.f_{yk} \ge A_c.f_{ctm} \Rightarrow \boxed{A_s \ge A_{s,\,min} = A_c \frac{f_{ctm}}{f_{yk}}} \qquad [5.8]$$

Remarque

Pour une section carrée de 24 cm de côté :

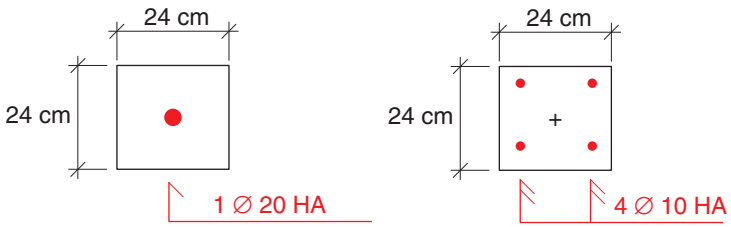
– sollicitation de fissuration (f_{ck} = 25 MPa) :

$N_f = A_c.f_{ctm} = 0{,}24.0{,}24.2{,}60 = 0{,}150$ MN ;

– armatures s'opposant à la fissuration (S 500 PH) :

$A = \frac{N_f}{f_{yk}} = \frac{0{,}150}{500}10^4 = 3{,}00$ cm^2 ⇒ 1 ϕ 20 HA (A = 3,14 cm^2) ou 4 ϕ 10 HA (A = 4.0,79 = 3,16 cm^2).

4. EC 2 – 7.3.2 (1)P



5.2 Cas où la maîtrise de la fissuration est requise

Dans ce cas, la section minimale d'armatures requise est donnée par (voir § 3.2, chapitre 14 : « ELS de fissuration », avec b.h = $A_{ct} = A_c$) :

$$A_{s,\ min} = \begin{cases} A_c \dfrac{f_{ctm}}{f_{yk}} : h \le 30\ cm \\ 0,65.A_c \dfrac{f_{ctm}}{f_{yk}} : h \ge 80\ cm \end{cases} \qquad [5.9]$$

Pour les valeurs de h intermédiaires, entre 30 et 80 cm, A_{smin} est obtenu par interpolation linéaire.

6. Armatures transversales

6.1 En zone courante

Bien qu'aucune indication ne figure dans les règles de l'EC 2, une règle de bonne construction consiste à prendre :

$s \le a$

a = plus petite dimension transversale de la pièce.

6.2 En zone de recouvrement

6.2.1 Contrainte ultime d'adhérence

Voir § 3.4, chapitre 4 : « Dispositions constructives ».

$$f_{bd} = 2,25.\eta_1.\eta_2.f_{ctd} \qquad [5.10] \quad \textbf{(8.2)}$$

où :

$$\eta_1 = \begin{cases} 1 : \text{bonnes conditions d'adhérence,} \\ 0,7 : \text{conditions d'adhérence médiocres,} \end{cases}$$

$$\eta_2 = \begin{cases} 1 : \phi \leq 32 \text{ mm}, \\ \dfrac{132 - \phi}{100} : \phi > 32 \text{ mm}. \end{cases}$$

$$\boxed{f_{ctd} = \alpha_{ct} \frac{f_{ctk,\ 0,05}}{\gamma_c}} = \text{résistance de calcul en traction du béton}^5,$$

$\alpha_{ct} = 1$, valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[6],

$f_{ctk,\ 0,05}$ = résistance caractéristique à la traction d'ordre 5 % limitée supérieurement à 3,1 MPa,

$$\gamma_c = \begin{cases} 1,2 \text{ pour les situations accidentelles}, \\ 1,5 \text{ dans les autres cas}. \end{cases}$$

6.2.2 Longueurs d'ancrage

Longueur de scellement droit (voir § 3.6, chapitre 4 : « Dispositions constructives ») :

$$\boxed{l_b = \frac{\phi}{4} . \frac{f_{yk}}{f_{bd}}} \qquad [5.11]$$

Longueur d'ancrage de référence (voir § 3.7, chapitre 4 : « Dispositions constructives ») :

$$\boxed{l_{b,\ rqd} = \frac{\phi}{4} . \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}} \qquad [5.12] \textbf{ (8.3)}$$

6.2.3 Longueur de recouvrement

Voir § 7.1.2, chapitre 4 : « Dispositions constructives »[7] :

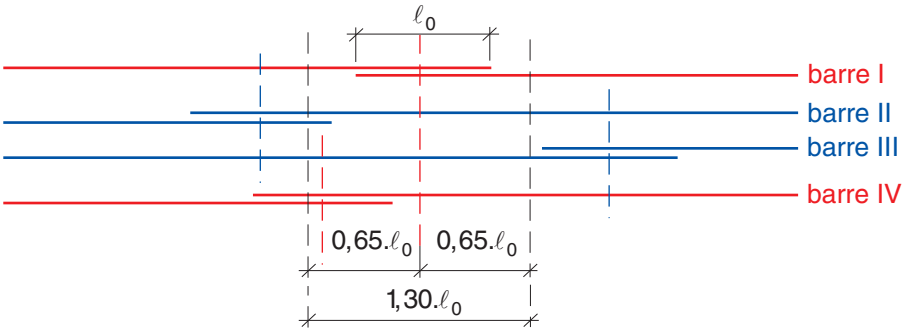
$$\boxed{l_0 = \text{Max} \begin{cases} \alpha_1 . \alpha_2 . \alpha_3 . \alpha_4 . \alpha_5 . \alpha_6 . l_{b,\ rqd} \\ 0,7 . \alpha_1 . \alpha_4 . \alpha_6 . l_{b,\ rqd} \\ l_{0,\ min} \end{cases}} \qquad [5.13] \textbf{ (8.10)}$$

5. EC 2 – 3.1.6 (2)P
6. EC 2 – voir AN
7. EC 2 – 8.7.3 (1)

avec :

α_1, α_2, α_3, α_4 et α_5 comme pour les ancrages droits (voir § 3.8, chapitre 4 : « Dispositions constructives ») en prenant ici $\sum A_{st,\ min} = A_s \frac{\sigma_{sd}}{f_{yd}}$ où A_s = aire de la section d'une des barres comportant un recouvrement,

$\alpha_6 = \sqrt{\frac{\rho_1}{25}} \in [1\ ;\ 1{,}5]$ où ρ_1 = pourcentage de barres avec recouvrements dont l'axe se situe dans la plage d'amplitude $\pm\ 0{,}65.l_0$ par rapport à l'axe du recouvrement considéré :



Les barres II et III sont en dehors de la zone considérée et

$\rho_1 = 50\ \% \ \Rightarrow\ \alpha_6 = \sqrt{\frac{50}{25}} = 1{,}41$

$$l_{0,\ min} = \text{Max} \begin{cases} 0{,}3.\alpha_6.l_{b,\ rqd} \\ 15.\phi \\ 200\ \text{mm} \end{cases} \qquad [5.14]\ \textbf{(8.11)}$$

Remarque

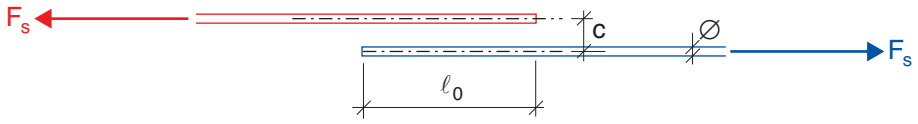
Si les barres en recouvrement ont des diamètres différents, la longueur de recouvrement l_0 doit être évaluée à partir de la plus grande longueur d'ancrage de référence $l_{b,\ rqd}$.

Dispositions constructives[8] :

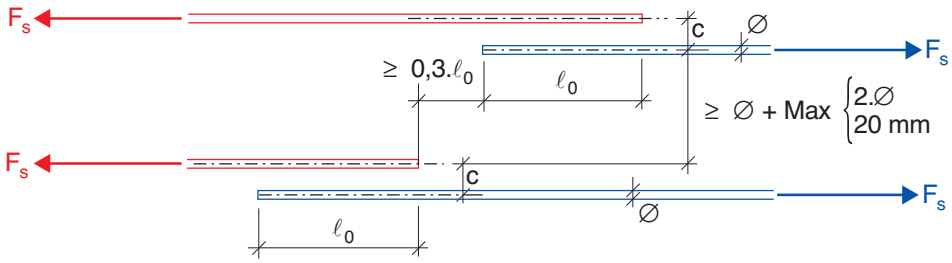
$c - \phi \leq \text{Min} \begin{cases} 50\ \text{mm} \\ 4.\phi \end{cases}$, sinon, augmenter l_0 de $(c - \phi)$.

8. EC 2 – 8.7.2 (3)

- recouvrement isolé :



- recouvrements voisins :



Proportions maximales de barres en recouvrement[9] :

- 100 % : barres tendues situées dans un même lit ;
- 50 % : barres tendues disposées en plusieurs lits.

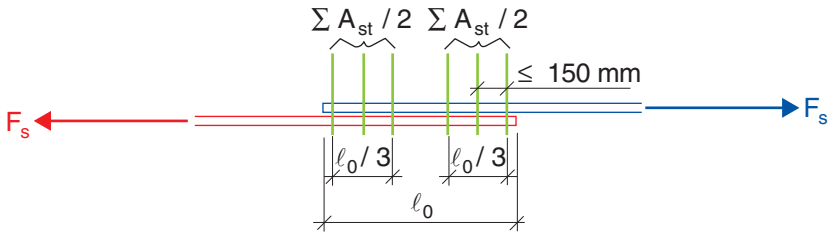
6.2.4 Armatures transversales

Les plans des recouvrements doivent être cousus par des armatures transversales.

Il n'est pas nécessaire de prévoir des armatures transversales spécifiques au recouvrement (autres que celles prévues pour d'autres raisons comme les armatures d'âme ou de répartition[10]) :

- si $\phi < 20$ mm ;
- ou si la proportion des barres en recouvrement est inférieure à 25 %.

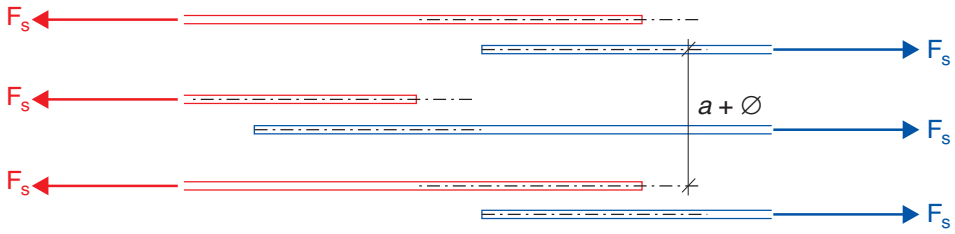
Dans le cas où $\phi \geq 20$ mm, les dispositions à respecter sont les suivantes pour les barres tendues[11] :



9. EC 2 – 8.7.2 (4)
10. EC 2 – 8.7.4.1 (2)
11. EC 2 – 8.7.4.1 (3)

$\boxed{\sum A_{st} \geq A_s}$ avec : A_s = section d'une barre en recouvrement.

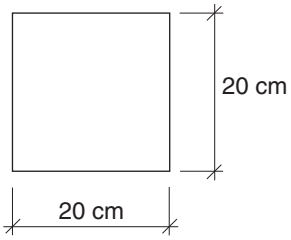
Dans une section donnée, si plus de 50 % des barres sont en recouvrement et si la distance a entre recouvrements adjacents est au plus égale à 10.ϕ, il convient d'utiliser comme armatures transversales des cadres, étriers ou épingles ancrés dans la section[12] :



II. APPLICATIONS

Application n° 1 : tirant – armatures

–Énoncé–



Sollicitations de traction (sans déformations imposées) :

- N_G = 100 kN sous charges permanentes ;
- N_Q = 40 kN sous charges variables.

Maîtrise de la fissuration non requise.

Matériaux :

- béton : f_{ck} = 25 MPa ;
- aciers : S 500 A ;
- enrobage nominal : c_{nom} = 3 cm.

On se propose :
1/ de déterminer les armatures longitudinales ;
2/ de calculer les armatures transversales.

12. EC 2 – 8.7.4.1 (3)

–Corrigé–

1. Caractéristiques des matériaux

1.1 Béton

$f_{ck} \leq 50$ MPa $\Rightarrow$ $f_{ctm} = 0,3.\left[f_{ck}\right]^{2/3}$ $\quad f_{ctm} = 0,3.\left[25\right]^{2/3} = 2,56$ MPa

$f_{ctk,\ 0,05} = 0,7.f_{ctm}$ $\quad f_{ctk,\ 0,05} = 0,7.2,56 = 1,79$ MPa

1.2 Aciers

pas de déformations imposées $\Rightarrow$ $\overline{\sigma_s} = k_3.f_{yk}$ $\quad \overline{\sigma_s} = 0,8.500 = 400$ MPa

S 500 A $\Rightarrow$ $\sigma_{s,\ u} = g\left(\varepsilon_{ud},\ k\dfrac{f_{yk}}{\gamma_s}\right)$ $\quad \sigma_{s,\ u} = 454$ MPa

$f_{yd} = \dfrac{f_{yk}}{\gamma_s}$ $\quad f_{yd} = \dfrac{500}{1,15} = 435$ MPa

2. Sollicitations

2.1 ELU

$N_{Ed} = 1,35.N_G + 1,5.N_Q$ $\quad N_{Ed} = 1,35.100 + 1,5.40 = 195$ kN

2.2 ELS

$N_{ser} = N_G + N_Q$ $\quad N_{ser} = 100 + 40 = 140$ kN

3. Maîtrise de la fissuration

maîtrise de la fissuration non requise $\Rightarrow$ $A_s \geq A_{s,\ min} = A_c \dfrac{f_{ctm}}{f_{yk}}$

$A_{s,\ min} = 20.20\dfrac{2,56}{500} = 2,05\ cm^2$

4. Armatures longitudinales

4.1 État limite ultime

$$A_{s,\,u} = \frac{N_{Ed}}{\sigma_{s,\,u}} \qquad A_{s,\,u} = \frac{0{,}195}{454} 10^4 = 4{,}30\ \text{cm}^2$$

Remarque

À l'ELS :

$$A_{s,\,ser} = \frac{N_{ser}}{\overline{\sigma_s}} \qquad A_{s,\,ser} = \frac{0{,}140}{400} 10^4 = 3{,}50\ \text{cm}^2 < A_{s,\,u}$$

4.2 État limite retenu

Résistance :

$A_s = A_{s,\,u}$ $\qquad A_s = 4{,}30\ \text{cm}^2$

Non-fragilité :

$A_s > A_{s,\,min}$ $\qquad A_s = 4{,}30\ \text{cm}^2 > 2{,}05\ \text{cm}^2 = A_{s,\,min}$ O.K.

Conclusion :

$A_s = 4{,}30\ \text{cm}^2$ $\Rightarrow$ $\boxed{4\ \phi\ 12\ \text{HA}}$

$A = 4.1{,}13 = 4{,}52\ \text{cm}^2$

5. Armatures transversales

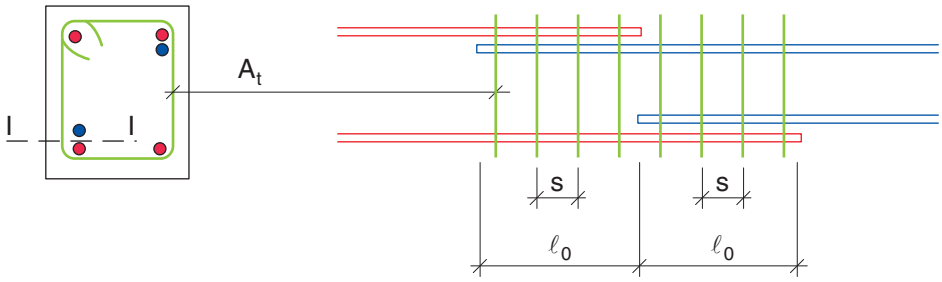
5.1 Zone courante

En prenant :

$$\phi_t = 6\ \text{mm}\ \left(> \frac{\phi_l}{3} = \frac{12}{3} = 4\ \text{mm} \right)$$

$s = a$ $\qquad \boxed{\text{Cadres } \phi\ 6\ \text{HA} : s = 20\ \text{cm}}$

5.2 Zone de recouvrements



Les recouvrements sont décalés de la longueur l_0 de recouvrement.

5.2.1 Contrainte ultime d'adhérence

$f_{bd} = 2,25.\eta_1.\eta_2.f_{ctd}$

avec :

$\eta_1 = \begin{cases} 1 : \text{bonnes conditions d'adhérence,} \\ 0,7 : \text{conditions d'adhérence médiocres,} \end{cases}$

armatures horizontales et

$h = 20 \text{ cm} < 250 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad \eta_1 = 1$

$\eta_2 = \begin{cases} 1 : \phi \leq 32 \text{ mm,} \\ \dfrac{132 - \phi}{100} : \phi > 32 \text{ mm.} \end{cases}$

$\phi = 12 \text{ mm} < 32 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad \eta_2 = 1$

$f_{ctd} = \alpha_{ct} \dfrac{f_{ctk,\,0,05}}{\gamma_s}$

$f_{ctd} = 1 \dfrac{1,79}{1,5} = 1,19 \text{ MPa}$

avec $f_{ctk,\,0,05} \leq 3,1 \text{ MPa}$

$f_{bd} = 2,25.1.1.1,19 = 2,68 \text{ MPa}$

5.2.2 Longueur d'ancrage de référence

$l_{b,\,rqd} = \dfrac{\phi}{4} . \dfrac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$

$\sigma_{sd} = \dfrac{N_{Ed}}{A_s}$

$\sigma_{sd} = \dfrac{195.10^{-3}}{4.1,13.10^{-4}} = 431 \text{ MPa}$

$l_{b,\,rqd} = \dfrac{\phi}{4} . \dfrac{431}{2,68} = 40,21.\phi$

$l_{b,\,rqd} = 40,21.1,2 = 48,25 \text{ cm}$

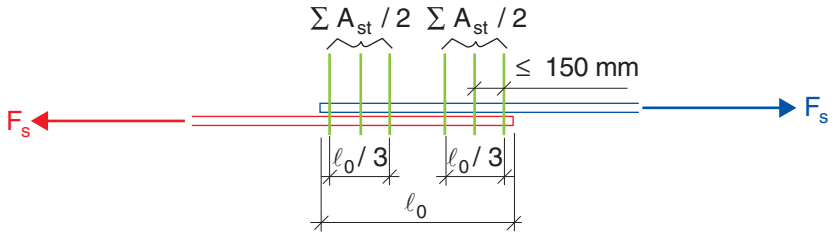
5.2.3 Armatures transversales

Recouvrements des 4 barres décalés de $l_0 \Rightarrow \rho_l = \frac{1}{4}$

Pas d'armatures transversales spécifiques si :

$$\begin{cases} \phi < 20 \text{ mm} \\ \rho_l < 0,25 \end{cases} \qquad \begin{cases} \phi = 12 \text{ mm} < 20 \text{ mm} \\ \rho_l = 0,25 \geq 0,25 \end{cases} \Rightarrow$$

Armatures transversales spécifiques sur le recouvrement.



$$\sum A_{st} \geq A_s$$

avec : A_s = section d'une barre en recouvrement :

$$1\ \phi\ 12\ \text{HA} \Rightarrow \sum A_{st} \geq 1,13\ \text{cm}^2$$

$$\phi_t \approx \frac{\phi_l}{3} = \frac{12}{3} = 4\ \text{mm} \Rightarrow \phi_t \approx 6\ \text{mm}$$

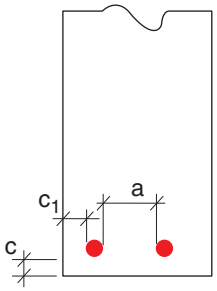
5.2.4 Longueur de recouvrement

$$l_0 = \text{Max} \begin{cases} \alpha_1.\alpha_2.\alpha_3.\alpha_4.\alpha_5.\alpha_6.l_{b,\ rqd} \\ 0,7.\alpha_1.\alpha_4.\alpha_6.l_{b,\ rqd} \\ l_{0,\ min} \end{cases}$$

avec :

α_1, fonction de la forme des barres : barres droites tendues $\Rightarrow \alpha_1 = 1$

$\alpha_2 = 1 - 0,15\frac{c_d - \phi}{\phi} \in [0,7 ; 1]$, fonction des conditions d'enrobage



où :

$c_1 = c = c_{nom} + \phi_t$

$$c_d = \text{Min}\begin{cases} \frac{a}{2} \\ c_1 \\ c \end{cases} \qquad c_d = 3{,}6 \text{ cm} = \text{Min}\begin{cases} \frac{20 - 2(3 + 0{,}6 + 1{,}2)}{2} = 5{,}2 \text{ cm} \\ 3 + 0{,}6 = 3{,}6 \text{ cm} \\ 3 + 0{,}6 = 3{,}6 \text{ cm} \end{cases}$$

$$\alpha_2 = 1 - 0{,}15\frac{3{,}6 - 1{,}2}{1{,}2} = 0{,}7 \in [0{,}7\,;1] \Rightarrow \alpha_2 = 0{,}7$$

$\alpha_3 = 1 - K.\lambda \in [0{,}7\,;1]$, fonction des armatures transversales

où :

K, fonction de la position relative des armatures longitudinales et transversales :

A_s dans l'angle d'un cadre transversal

$\Rightarrow$ K = 0,1

$$\lambda = \frac{\sum A_{st} - \sum A_{st,\,min}}{A_s}$$

$\sum A_{st}$ = aire de la section des armatures transversales le long de l_0 :

$\sum A_{st} = 6.0{,}28 = 1{,}68 \text{ cm}^2$

pour 2.3 cadres ϕ 6 HA

A_s = aire de la section d'une des barres comportant un recouvrement :

$$A_s = 1{,}13 \text{ cm}^2 \ (1\ \phi\ 12 \text{ HA})$$

$$\sum A_{st,\ min} = A_s \frac{\sigma_{sd}}{f_{yd}} \qquad \sum A_{st,\ min} = 1{,}13 \frac{431}{435} = 1{,}12 \text{ cm}^2$$

$$\lambda = \frac{1{,}68 - 1{,}12}{1{,}13} = 0{,}50$$

$$\alpha_3 = 1 - 0{,}1.0{,}5 = 0{,}95$$

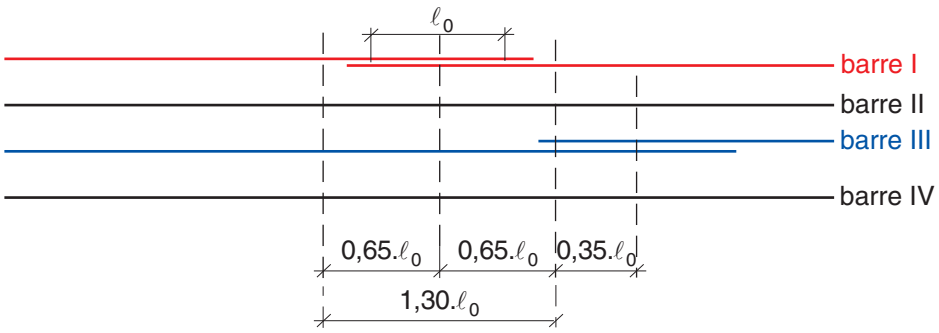
α_4 , fonction du confinement par des armatures transversales :

armatures sans soudure $\Rightarrow$ $\alpha_4 = 1$

$\alpha_5 = 1 - 0{,}04.p \in [0{,}7\ ;\ 1]$, fonction des conditions de pression transversale :

$p = 0 \Rightarrow \alpha_5 = 1$

$\alpha_6 = \sqrt{\frac{\rho_1}{25}} \in [1\ ;\ 1{,}5]$ recouvrements décalés de l_0



Le recouvrement de la barre III n'intervient pas pour ρ_1 $\Rightarrow$ $\rho_1 = \frac{1}{4} = 25\ \%$

$$\alpha_6 = \sqrt{\frac{25}{25}} = 1{,}00 \Rightarrow \alpha_6 = 1$$

$$l_0 = \text{Max} \begin{cases} 1.0, 7.0, 95.1.1.1.40, 21.\phi = 26, 74.\phi \\ 0, 7.1.1.1.40, 21.\phi = 28, 15.\phi \end{cases}$$

$$l_0 = 28{,}15.1{,}2 = 33{,}78 \approx 34 \text{ cm}$$

Barres tendues : $l_{0,\ min} = \text{Max}\begin{cases} 0{,}3.\alpha_6.l_{b,\ rqd} \\ 15.\phi \\ 200\ \text{mm} \end{cases}$

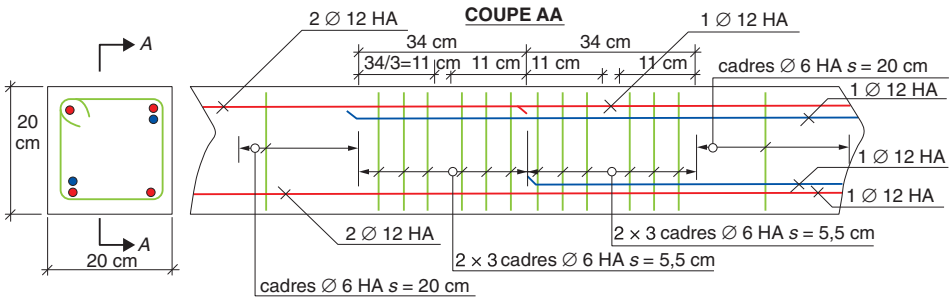
$$l_{0,\ min} = 20\ \text{cm} = \text{Max}\begin{cases} 0{,}3.1.40{,}21.1{,}2 = 14{,}48\ \text{cm} \\ 15.1{,}2 = 18\ \text{cm} \\ 20\ \text{cm} \end{cases}$$

$$l_0 = 34\ \text{cm} > l_{0,\ min} = 20\ \text{cm} \Rightarrow \boxed{l_0 = 34\ \text{cm}}$$

$$\Rightarrow \quad s = \frac{l_0}{2.3} = \frac{34}{2.3} = 5{,}7\ \text{cm}$$

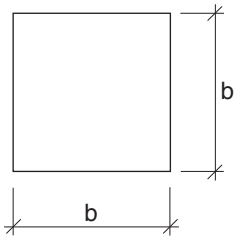
$$\Rightarrow \quad \boxed{\text{2.3 cadres } \phi\ 6\ \text{HA} : s = 5{,}5\ \text{cm}}$$

6. Schéma de ferraillage



Application n° 2 : tirant – armatures et coffrage

–Énoncé–



Sollicitations de traction (sans déformations imposées) :

- N_G = 300 kN sous charges permanentes ;
- N_Q = 100 kN sous charges variables.

Maîtrise de la fissuration non requise.

Matériaux :

- béton : f_{ck} = 25 MPa ;
- aciers : S 500 A;
- enrobage nominal : c_{nom} = 3 cm ;
- granulats : d_g = 25 mm.

On se propose :

- de déterminer les armatures longitudinales ;
- de dimensionner le coffrage du tirant ;
- de calculer les armatures transversales.

–Corrigé–

1. Caractéristiques des matériaux

1.1 Béton

$f_{ck} \leq 50$ MPa $\Rightarrow f_{ctm} = 0{,}3\,[f_{ck}]^{2/3}$ $\qquad f_{ctm} = 0{,}3.[25]^{2/3} = 2{,}56$ MPa

$f_{ctk,\,0{,}05} = 0{,}7.f_{ctm}$ $\qquad f_{ctk,\,0{,}05} = 0{,}7.2{,}56 = 1{,}79$ MPa

1.2 Aciers

pas de déformations imposées $\Rightarrow$ $\overline{\sigma_s} = k_3.f_{yk}$ $\qquad \overline{\sigma_s} = 0{,}8.500 = 400$ MPa

S 500 A $\Rightarrow$ $\sigma_{s,\,u} = g\left(\varepsilon_{ud}, k\dfrac{f_{yk}}{\gamma_s}\right)$ $\qquad \sigma_{s,\,u} = 454$ MPa

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \qquad f_{yd} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ MPa}$$

2. Sollicitations

2.1 ELU

$$N_{Ed} = 1,35.N_G + 1,5.N_Q \qquad N_{Ed} = 1,35.300 + 1,5.100 = 555 \text{ kN}$$

2.2 ELS

$$N_{ser} = N_G + N_Q \qquad N_{ser} = 300 + 100 = 400 \text{ kN}$$

3. Armatures longitudinales

3.1 État limite ultime

$$A_{s,\,u} = \frac{N_{Ed}}{\sigma_{s,\,u}} \qquad A_{s,\,u} = \frac{0,555}{454}10^4 = 12,22 \text{ cm}^2$$

Remarque

À l'ELS :

$$A_{s,\,ser} = \frac{N_{ser}}{\overline{\sigma_s}} \qquad A_{s,\,ser} = \frac{0,400}{400}10^4 = 10,00 \text{ cm}^2 < A_{s,\,u}$$

3.2 État limite retenu

Résistance :

$$A_s = A_{s,\,u} \qquad A_s = 12,22 \text{ cm}^2 \Rightarrow 4\,\phi\,20 \text{ HA}$$

$$A = 4.3,14 = 12,56 \text{ cm}^2$$

4. Coffrage

- Maîtrise de la fissuration :

maîtrise de la fissuration non requise $\Rightarrow \quad A_s \geq A_{s,\,min} = A_c \frac{f_{ctm}}{f_{yk}}$

$$A_c \leq 4.3,14.10^{-4} \frac{500}{2,56} = 0,245 \text{ m}^2$$

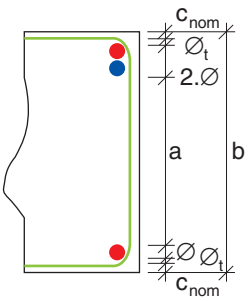
$b \le \sqrt{A_c}$ $\qquad b \le \sqrt{0,245} = 0,495$ m

- **Encombrement des armatures :**
- en prenant

$$\phi_t = 8 \text{ mm} \left(> \frac{\phi_l}{3} = \frac{20}{3} = 7 \text{ mm} \right)$$

- en décalant les recouvrements de la longueur l_0

$$a \ge \text{Max} \begin{cases} k_1.\phi \\ 20 \text{ mm} \\ d_g + k_2 \end{cases} \qquad \begin{matrix} k_1 = 1 \\ k_2 = 5 \text{ mm} \end{matrix} \Rightarrow \quad a \ge 30 \text{ mm} = \text{Max} \begin{cases} 1.20 = 20 \text{ mm} \\ 20 \text{ mm} \\ 25 + 5 = 30 \text{ mm} \end{cases}$$



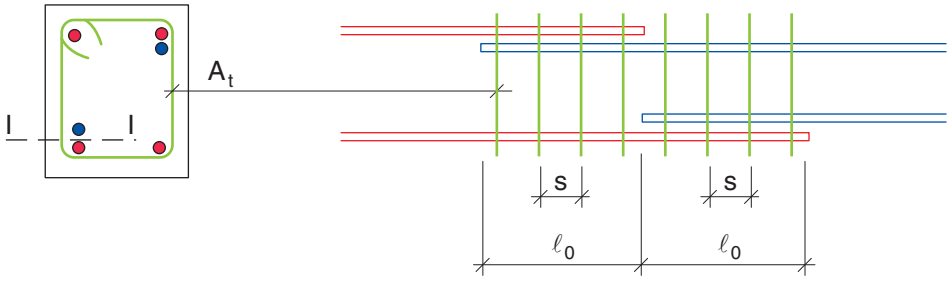
- $b \ge a + 3.\phi + 2(\phi_t + c_{nom})$ $\qquad b \ge 30 + 3.20 + 2(8 + 30) = 166$ mm

$\Rightarrow$ Prenons b = 20 cm < 49,5 cm

Tirant 20 cm × 20 cm

5. Armatures transversales

5.1 Zone de recouvrements



En prenant :

$\phi_t = 8 \text{ mm} \left(> \frac{\phi_l}{3} = \frac{20}{3} = 7 \text{ mm} \right)$

les recouvrements sont décalés de la longueur l_0 de recouvrement.

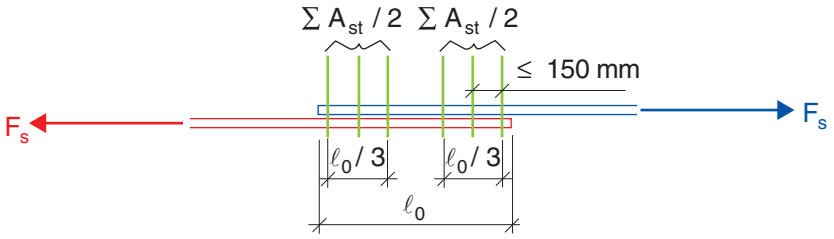
5.1.1 Armatures transversales

Recouvrements des 4 barres décalés de $l_0 \Rightarrow \rho_l = \frac{1}{4}$

Pas d'armatures transversales spécifiques si :

$\begin{cases} \phi < 20 \text{ mm} \\ \rho_l < 0,25 \end{cases}$ $\quad$ $\begin{cases} \phi = 20 \text{ mm} \leq 20 \text{ mm} \\ \rho_l = 0,25 \leq 0,25 \end{cases} \Rightarrow$

armatures transversales spécifiques sur le recouvrement.



$\sum A_{st} \geq A_s$

avec : A_s = section d'une barre en recouvrement :

$1 \phi 20 \text{ HA} \Rightarrow \sum A_{st} \geq 3,14 \text{ cm}^2$

$\Rightarrow$ 2.3 cadres : $A_{st} = \frac{\sum A_{st}}{2.3} = \frac{3,14}{2.3} = 0,52 \text{ cm}^2$

$A_{st} > 0,50 \text{ cm}^2$

$\Rightarrow \phi_t \approx 10 \text{ mm} \quad A_{st} > 0,79 \text{ cm}^2$

5.1.2 Longueur de recouvrement

$\sigma_{sd} = \frac{N_{Ed}}{A_s}$ $\qquad$ $\sigma_{sd} = \frac{0,555}{12,56.10^{-4}} = 442 \text{ MPa}$

$l_0 = 67$ cm (voir application n° 3, chapitre 4 : « Dispositions constructives »)

2.3 cadres ϕ 10 HA sur $l_0 = 67$ cm

$$\Rightarrow \quad s = \frac{l_0}{2.3} = \frac{67}{2.3} = 11,2 \text{ cm}$$

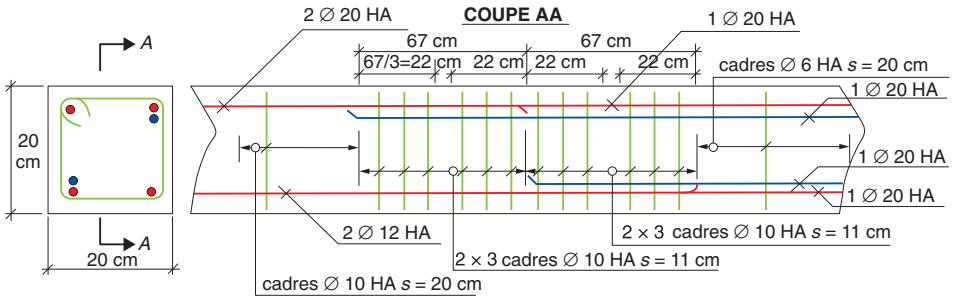
$$\Rightarrow \quad \boxed{2.3 \text{ cadres } \phi\, 10 \text{ HA} : s = 11 \text{ cm}}$$

5.2 Zone courante

En conservant des cadres ϕ 10 mm :

$s = a$ $\Rightarrow$ Cadres ϕ 10 HA : s = 20 cm

6. Schéma de ferraillage

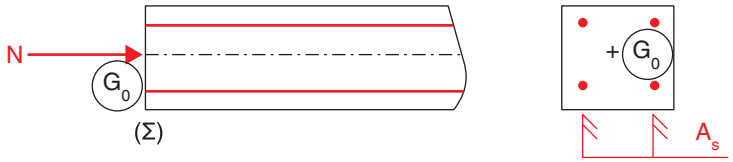


6 Compression centrée

I. RAPPELS THÉORIQUES

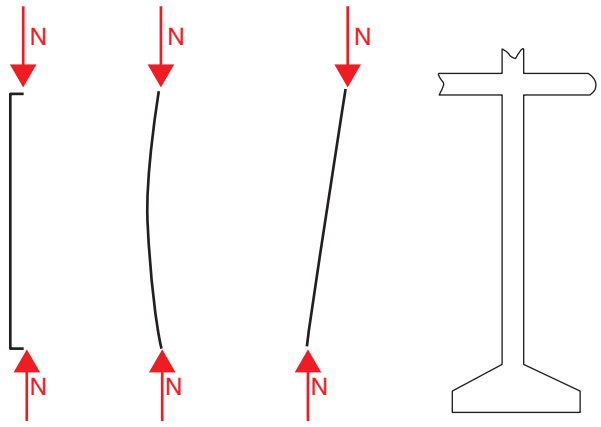
1. Hypothèses

Une poutre rectiligne est sollicitée en compression centrée lorsque l'ensemble des forces extérieures agissant à gauche de la section droite Σ se réduit au centre de gravité de la section à une force unique N (effort normal) perpendiculaire à Σ et dirigée vers la droite.

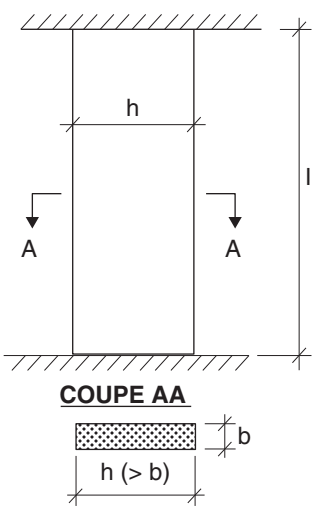


Cette sollicitation ne se rencontre jamais en pratique. Un poteau réel est toujours soumis à la flexion composée (effort normal N et moment fléchissant $M = N.e_x$) par suite :

- de la dissymétrie du chargement ;
- des imperfections d'exécution :
  - non rectitude de l'axe ;
  - défaut de verticalité ;
  - etc. ;
- de la solidarisation poteau/poutre, etc.



Sont considérés comme poteaux les éléments tels que :



$\frac{l}{h} \geq 3$ (sinon, calcul en voile[1])

$h < 4.b$ [6.1]

On considère conventionnellement comme soumis à une « compression centrée » tout poteau isolé :

- sollicité uniquement par un effort normal de compression N_{Ed} ;
- lorsque son élancement vérifie[2] :

$$\lambda = \frac{l_0}{i} < \lambda_{lim} = \frac{20.A.B.C}{\sqrt{n}} \qquad [6.2]\ (5.13N)$$

valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[3]

avec :

l_0 = longueur efficace de l'élément vertical généralement déduite de la théorie du flambement élastique,

i = rayon de giration de la section droite (béton seul),

$A = \frac{1}{1 + 0,2.\varphi_{ef}} = 0,7$ si φ_{ef} est inconnu,

$B = \sqrt{1 + 2.\omega} = 1,1$ si ω est inconnu,

$C = 1,7 - r_m = 0,7$ si r_m est inconnu,

1. EC 2 – 5.3.1 (7) et 9.5.1
2. EC 2 – 5.8.3.1 (1)
3. EC 2 – voir AN

$n = \dfrac{N_{Ed}}{A_c.f_{cd}}$ = effort normal relatif,

où :

$$\varphi_{ef} = \varphi(\infty, t_0)\frac{M_{OEqp}}{M_{OEd}} \qquad \textbf{(5.19)}$$

$\varphi(\infty, t_0)$ = valeur finale du coefficient de fluage[4] (voir § 2.3.3.4, chapitre 2 : « Matériaux »),

M_{OEqp} = moment de service du premier ordre sous la combinaison d'actions quasi permanente[5] (ELS),

M_{OEd} = moment ultime du premier ordre sous la combinaison de charges de calcul (y compris imperfections géométriques[6]),

$\omega = \dfrac{A_s.f_{yd}}{A_c.f_{cd}}$ = pourcentage mécanique d'armatures,

A_s = aire totale des armatures longitudinales,

A_c = aire de la section droite (béton seul),

$f_{cd} = \alpha_{cc}\dfrac{f_{ck}}{\gamma_c}$ ($\alpha_{cc} = 1$: valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[7] y compris dans le cas des ponts[8]),

$f_{yd} = \dfrac{f_{yk}}{\gamma_s}$

$$r_m = \begin{cases} 1 : \text{éléments non contreventés en général,} \\ 1 : \text{éléments contreventés avec moments du premier ordre dus principalement à des imperfections ou à des charges transversales,} \\ \dfrac{M_{01}}{M_{02}} : \text{autres cas.} \end{cases}$$

4. EC 2 – 3.1.4 (4)
5. EC 2 – 5.8.4 (2)
6. EC 2 – voir ANY
7. EC 2 – voir AN
8. EC 2 – 3.1.6 (101)P + AN

M_{01} et M_{02} = valeurs algébriques des moments du premier ordre aux deux extrémités de l'élément avec : $|M_{02}| \geq |M_{01}|$.

Dans une poutre rectiligne en béton armé (poteau, colonne, pieu) sollicitée en compression centrée, le centre de gravité des armatures est confondu avec celui du béton seul.

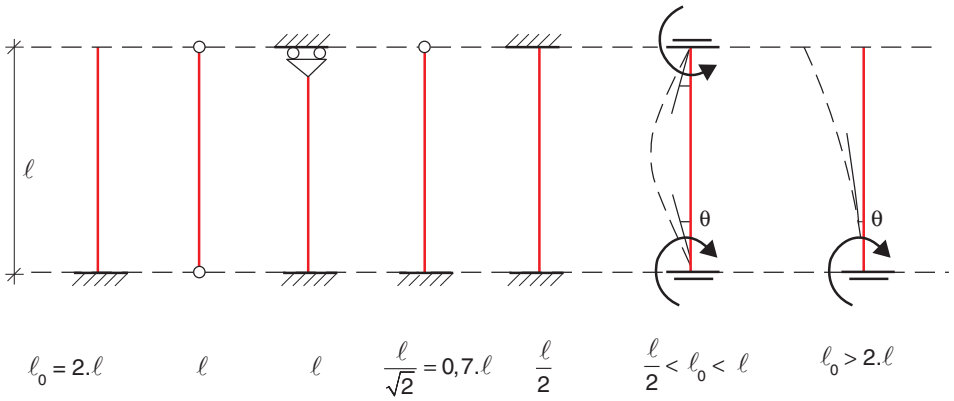
2. Élancement

La compression a pour effet d'accentuer les excentricités. Lorsque la longueur de la pièce comprimée est grande par rapport à ses autres dimensions, l'accroissement devient tel qu'il risque de se produire un phénomène d'instabilité appelé flambement.

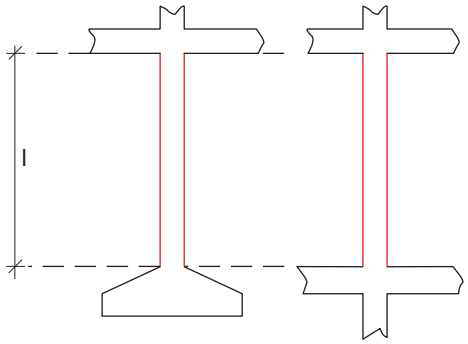
La susceptibilité au flambement est définie en fonction de l'élancement.

2.1 Longueur efficace l_0

La longueur efficace d'un poteau est égale à sa longueur de flambement[9] :



9. EC 2 – 5.8.3.2 (2)



Éléments de portique non intégrés au contreventement (donc, contreventés[10]) :

$$l_0 = 0,5.l\sqrt{\left(1+\frac{k_1}{0,45+k_1}\right).\left(1+\frac{k_2}{0,45+k_2}\right)} \qquad \textbf{(5.15)}$$

Éléments de portique intégrés au contreventement (donc non contreventés[11]) :

$$l_0 = l.\text{Max}\begin{cases}\sqrt{1+10\dfrac{k_1.k_2}{k_1+k_2}}\\ \left(1+\dfrac{k_1}{1+k_1}\right).\left(1+\dfrac{k_2}{1+k_2}\right)\end{cases} \qquad \textbf{(5.16)}$$

avec :

k_1, k_2 = coefficients de souplesse aux extrémités 1 et 2 respectivement tels que :

$$\theta = K.M = \frac{k.l}{EI}M \quad \Rightarrow \quad k = \frac{EI}{l}.\frac{\theta}{M}$$

où :

θ = rotation de flexion,

EI = rigidité à la flexion de la colonne,

l = longueur libre de la colonne entre nus des liaisons d'extrémité.

Remarque

Pour un encastrement parfait : $\theta = 0 \Rightarrow k = 0$.

Pour une extrémité libre : $M = 0 \Rightarrow k \to \infty$.

10. EC 2 – 5.8.3.2 (3)
11. EC 2 – 5.8.3.2 (3)

Les encastrements parfaits n'existant pas dans la pratique, la valeur minimale à considérer pour les coefficients de souplesse est : k_1 ou $k_2 = 0{,}1$.

Dans le cas où le nœud comporte un autre poteau pouvant influencer la rotation d'extrémité, il faut remplacer $\frac{EI}{l}$ par $\left[\left(\frac{EI}{l}\right)_a + \left(\frac{EI}{l}\right)_b\right]$, a et b désignant respectivement le poteau supérieur et le poteau inférieur[12].

Dans le cas où l'effort normal et/ou la section du poteau ne sont pas constants sur toute sa hauteur, la longueur efficace est obtenue par la théorie du flambement (RdM[13]) :

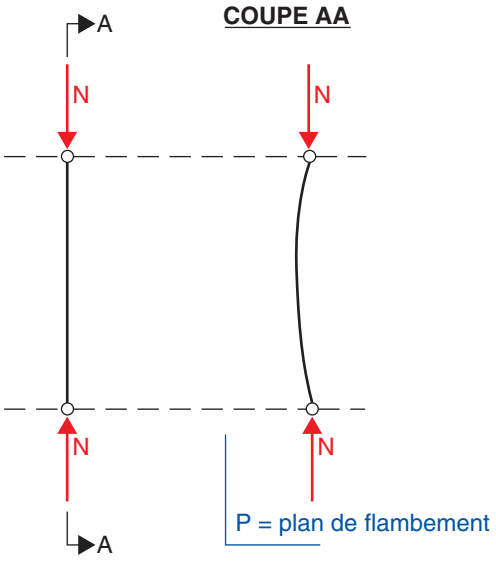
$$l_0 = \pi\sqrt{\frac{EI}{N_B}} \qquad \textbf{(5.17)}$$

avec : N_B = charge critique de flambement.

Dans l'évaluation de la longueur efficace, il convient de tenir compte de la fissuration, à moins que les éléments s'opposant à la déformation restent non fissurés à l'ELU[14].

2.2 Élancement

On appelle plan de flambement le plan contenant la ligne moyenne déformée de la pièce étudiée :



12. EC 2 – 5.8.3.2 (4)
13. EC 2 – 5.8.3.2 (6)
14. EC 2 – 5.8.3.2 (5)

Le plan de flambement mentionné plus loin est celui pour lequel $\lambda = \lambda_{max}$.

2.2.1 Cas général

$$\lambda = \frac{l_0}{i} \quad [15] \qquad [6.3] \quad \textbf{(5.14)}$$

avec :

$i = \sqrt{\frac{I_c}{A_c}}$ = rayon de giration de la section droite,

I_c = moment d'inertie de la section transversale (béton seul) par rapport à l'axe perpendiculaire au plan de flambement,

A_c aire de la section transversale (béton seul).

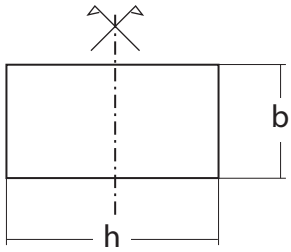
2.2.2 Cas particuliers

2.2.2.1 Section rectangulaire

Il faut normalement envisager les deux possibilités :

- flambement dans le plan parallèle au petit côté ;
- et flambement dans le plan parallèle au grand côté.

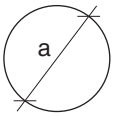
En désignant par l_{0b} et l_{0h} les longueurs efficaces (de flambement) correspondant aux liaisons d'extrémité dans le sens b (parallèle à la dimension b) et h (parallèle à la dimension h), on retiendra :



$$\lambda = \text{Max}\left\{\begin{array}{l} \frac{l_{0b}\sqrt{12}}{b}\left(I = \frac{h.b^3}{12}\ ,\ B = h.b\ ,\ i = \frac{b}{\sqrt{12}}\right) \\ \frac{l_{0h}\sqrt{12}}{h}\left(I = \frac{b.h^3}{12}\ ,\ B = h.b\ ,\ i = \frac{h}{\sqrt{12}}\right) \end{array}\right. \qquad [6.4]$$

15. EC 2 – 5.8.3.2 (1)

2.2.2.2 Section circulaire

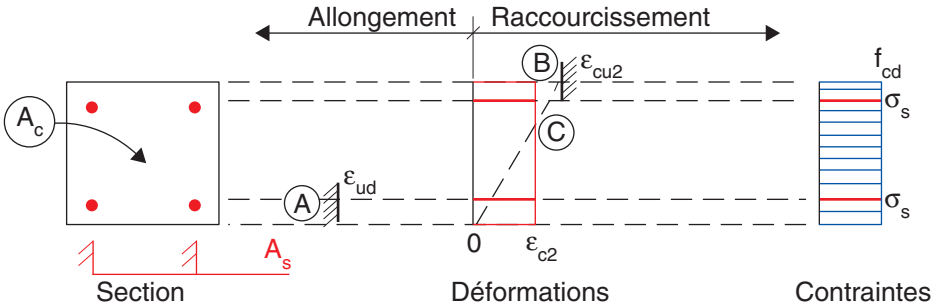


$$\left.\begin{aligned} I_c &= \frac{\pi.a^4}{64} \\ A_c &= \frac{\pi.a^2}{4} \end{aligned}\right\} \Rightarrow \quad i = \frac{a}{4} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\lambda = \frac{4.l_0}{a}} \qquad [6.5]$$

3. Armatures longitudinales

3.1 Force portante

À l'état limite ultime, le raccourcissement du béton sous compression centrée est limité, dans le cas du diagramme parabole-rectangle, à ε_{c2} . Le diagramme des déformations passe par le pivot C (voir § 2.4.1, chapitre 3 : « Béton armé - Généralités »), d'où :



L'effort normal limite théorique est :

$$N_{Rd,\ th} = A_c.f_{cd} + A_s.\sigma_s$$

D'où la condition à respecter :

$$\boxed{N_{Ed} \leq N_{Rd,\ th} = A_c.f_{cd} + A_s.\sigma_s} \qquad [6.6]$$

avec :

A_c aire de la section de béton,

$f_{cd} = \alpha_{cc}.\frac{f_{ck}}{\gamma_c}$ avec $\alpha_{cc} = 1$: valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[16] y compris dans le cas des ponts[17],

$$\sigma_s = \begin{cases} f_{yd} = \dfrac{f_{yk}}{\gamma_s} \text{ si } \varepsilon_{c2} > \dfrac{f_{yd}}{E_s} \\ E_s.\varepsilon_{c2} \quad \text{sinon} \end{cases}$$

3.2 Armatures longitudinales

3.2.1 Armatures calculées

Le béton équilibre :

$$F_c = A_c.f_{cd} \qquad [6.7]$$

Les aciers doivent équilibrer :

$$F_s = N_{Ed} - F_c \qquad [6.8]$$

D'où leur section :

$$\boxed{A_s = \frac{F_s}{\sigma_s}} \qquad [6.9]$$

avec :

$$\sigma_s = \begin{cases} f_{yd} = \dfrac{f_{yk}}{\gamma_s} \text{ si } \varepsilon_{c2} > \dfrac{f_{yd}}{E_s} \\ E_s.\varepsilon_{c2} \quad \text{sinon} \end{cases}$$

3.2.2 Sections extrêmes

A_c = aire de la section de béton.

On doit vérifier (valeurs recommandées et à utiliser pour l'Annexe nationale française[18]) :

16. EC 2 – voir AN
17. EC 2 – 3.1.6 (101)P + AN
18. EC 2 – 9.5.2 (2) & (3)

$$A_{s,\,min} \le A_s \le A_{s,\,max}$$

$$A_{s,\,min} = \frac{0{,}10.N_{Ed}}{f_{yd}} \not< 0{,}002.A_c = 0{,}2\frac{A_c}{100} \quad [19] \qquad [6.10]\ \textbf{(9.12N)}$$

$$A_{s,\,max} = \begin{cases} 0{,}04.A_c = 4\dfrac{A_c}{100} : \text{hors recouvrement,} \\ 0{,}08.A_c = 8\dfrac{A_c}{100} : \text{zone de recouvrement.} \end{cases}$$

avec :

N_{Ed} = effort normal agissant de compression,

A_c = aire de la section transversale de béton,

$f_{yd} = \dfrac{f_{yk}}{\gamma_s}$ = limite d'élasticité de calcul des armatures.

Si $A_s > A_{s,\,max}$ (y compris en zone de recouvrement), il faut revoir le coffrage.

3.2.3 Dispositions constructives

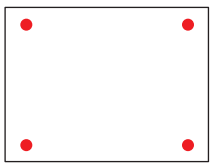
3.2.3.1 Diamètres

$$\phi \ge \phi_{min} = 8\ mm \quad [20] \qquad [6.11]$$

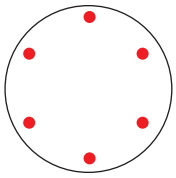
valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française.

3.2.3.2 Position des barres

Suivant la forme de la section droite :



n ≥ 4



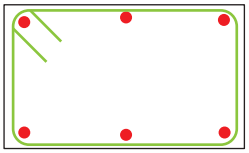
n ≥ 4

Sections polygonales : une barre au moins dans chaque angle[21].

19. EC 2 – voir AN
20. EC 2 – 9.5.2 (1) + voir AN
21. EC 2 – 9.5.2 (4)

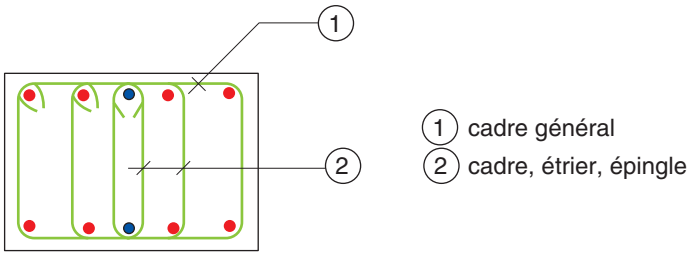
4. Armatures transversales

Les armatures transversales doivent maintenir toutes les barres situées près des angles[22] :



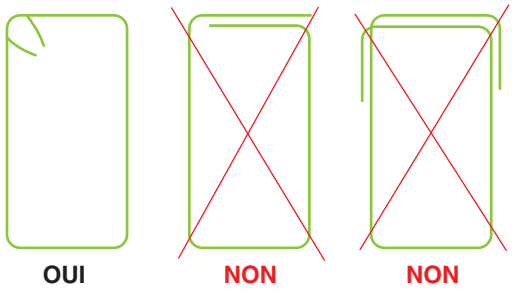
Elles sont constituées de nappes successives perpendiculaires à l'axe de la pièce et régulièrement espacées, avec :

- un cadre général entourant l'ensemble des armatures longitudinales ;
- des cadres, étriers ou épingles maintenant les barres longitudinales intermédiaires.



Les barres longitudinales non tenues doivent être à moins de 150 mm de la barre longitudinale tenue la plus proche[23].

Les retours d'équerre sont interdits. Il convient de prévoir des ancrages aux extrémités des cadres, étriers ou épingles avec retours dirigés vers la masse du béton :



22. EC 2 – 9.5.3 (6)
23. EC 2 – 9.5.3 (6)

4.1 Diamètres

$$\phi_t \geq \text{Max}\begin{cases}\phi_{min} = 6\text{ mm} \\ \dfrac{\phi_{l,\,max}}{4}\end{cases}$$ [24] [6.12]

Pour les treillis soudés : $\phi_t \geq \phi_{min,\,mesh} = 5\text{ mm}$ [6.13]

Pour les ponts, les valeurs recommandées pour ϕ_{min} et $\phi_{min,\,mesh}$ sont celles figurant ci-dessus[25].

4.2 Espacements

4.2.1 En zone courante

C'est-à-dire hors recouvrements et zones de liaison avec d'autres éléments[26] :

$$s_{cl,\,t\,max} = \text{Min}\begin{cases}20.\phi_{l,\,min} \\ b \\ 400\text{ mm}\end{cases}$$ [6.14]

valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[27],

avec :

b = plus petite dimension de la section transversale.

4.2.2 En zone de recouvrement ou de liaison avec d'autres éléments

4.2.2.1 Longueur de recouvrement

Contrainte ultime d'adhérence (voir § 3.4, chapitre 4 : « Dispositions constructives »).

$$f_{bd} = 2,25.\eta_1.\eta_2.f_{ctd}$$ [6.15] **(8.2)**

où :

$$\eta_1 = \begin{cases}1 : \text{bonnes conditions d'adhérence,} \\ 0,7 : \text{conditions d'adhérence médiocres,}\end{cases}$$

24. EC 2 – 9.5.3 (1)
25. EC 2 – 9.5.3 (101)
26. EC 2 – 9.5.3 (3)
27. EC 2 – voir AN

$$\eta_2 = \begin{cases} 1 : \phi \leq 32 \text{ mm}, \\ \dfrac{132 - \phi}{100} : \phi > 32 \text{ mm}. \end{cases}$$

$\boxed{f_{ctd} = \alpha_{ct} \dfrac{f_{ctk,\ 0,05}}{\gamma_c}}$ = résistance de calcul en traction du béton[28],

$\alpha_{ct} = 1$, valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[29],

$f_{ctk,\ 0,05}$ = résistance caractéristique à la traction d'ordre 5 % limitée supérieurement a 3,1 MPa,

$$\gamma_c = \begin{cases} 1,2 \text{ pour les situations accidentelles}, \\ 1,5 \text{ dans les autres cas}. \end{cases}$$

Longueur d'ancrage de référence (voir § 3.7, chapitre 4 : « Dispositions constructives ») :

$$\boxed{l_{b,\ rqd} = \frac{\phi}{4} . \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}} \qquad [6.16] \textbf{ (8.3)}$$

avec :

$$\sigma_{sd} = \frac{F_s}{A_{s,\ prov}}$$

où :

F_s = effort normal équilibré par les armatures longitudinales,

$A_{s,\ prov}$ = section d'armatures effectivement prévue.

Longueur de recouvrement[30] (voir § 7.1.2, chapitre 4 : « Dispositions constructives ») :

$$l_0 = \text{Max} \begin{cases} \alpha_1 . \alpha_2 . \alpha_3 . \alpha_4 . \alpha_5 . \alpha_6 . l_{b,\ rqd} \\ 0,7 . \alpha_1 . \alpha_4 . \alpha_6 . l_{b,\ rqd} \\ l_{0,\ min} \end{cases} \quad \text{avec } l_{0,\ min} = \text{Max} \begin{cases} 0,3 . \alpha_6 . l_{b,\ rqd} \\ 15 . \phi \\ 200 \text{ mm} \end{cases}$$

où, pour des barres comprimées $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1$, $\alpha_4 = 0,7$ ou 1 et α_5 est sans objet.

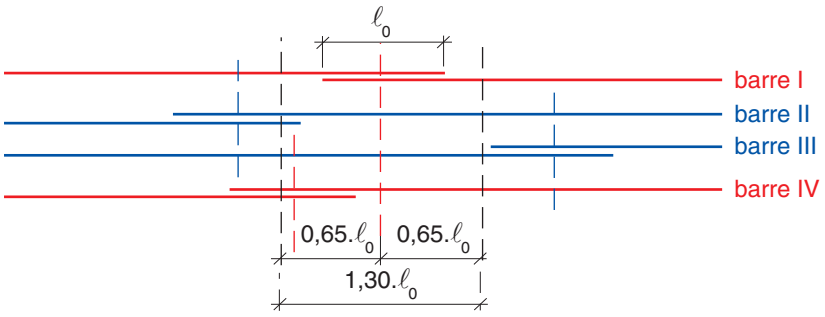
28. EC 2 – 3.1.6 (2)P
29. EC 2 – voir AN
30. EC 2 – 8.7.3 (1)

Ce qui conduit à la formule :

$$l_0 = \text{Max} \begin{cases} \alpha_4.\alpha_6.l_{b,\,rqd} \\ 15.\phi \\ 200 \text{ mm} \end{cases}$$

avec :

$\alpha_6 = \sqrt{\frac{\rho_1}{25}} \in [1\,;1{,}5]$ où ρ_1 = pourcentage de barres avec recouvrements dont l'axe se situe dans la plage d'amplitude ± 0,65.l_0 par rapport à l'axe du recouvrement considéré :



Les barres II et III sont en dehors de la zone considérée et

$\rho_1 = 50\,\% \Rightarrow \alpha_6 = \sqrt{\frac{50}{25}} = 1{,}41$

Remarque

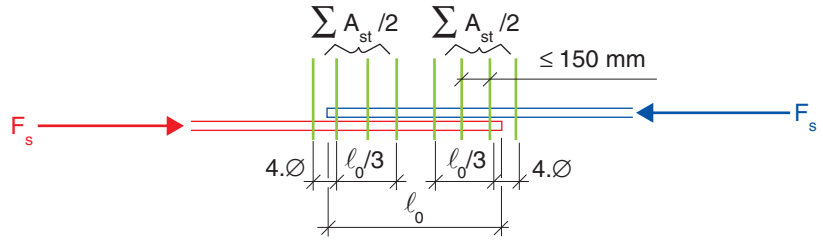
Si les barres en recouvrement ont des diamètres différents, la longueur de recouvrement l_0 doit être évaluée à partir de la plus grande longueur d'ancrage de référence $l_{b,\,rqd}$.

4.2.2.2 Disposition des armatures transversales

Dans le cas où $\phi \geq 20$ mm, à chaque extrémité du recouvrement, on dispose la moitié des armatures transversales de la manière suivante[31] :

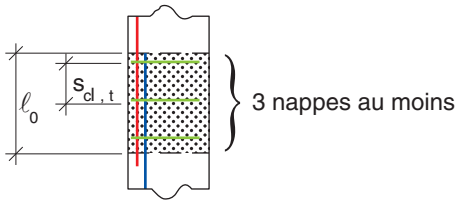
- trois nappes sur le recouvrement ;
- une nappe supplémentaire hors recouvrement.

31. EC 2 – 8.7.4.2



$\boxed{\sum A_{st} \geq A_s}$ avec : A_s = section d'une barre en recouvrement.

Si le diamètre maximal des barres longitudinales est supérieur à 14 mm, prévoir au moins trois nappes transversales, régulièrement espacées, sur la longueur de recouvrement[32].

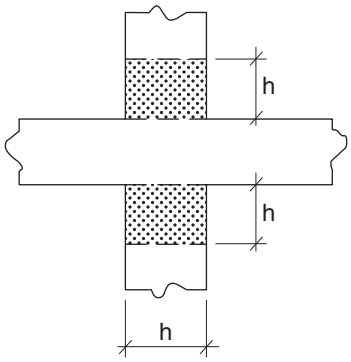


Dans la pratique, on assure un léger dépassement (2ϕ environ) des extrémités des barres arrêtées par rapport aux nappes extrêmes sur le recouvrement.

4.2.2.3 Espacement des armatures transversales

De part et d'autre des nœuds de liaison du poteau et sur les zones de recouvrement des barres longitudinales de diamètre supérieur à 14 mm, on peut respecter[33] :

$$\boxed{s_{cl,\,t} \leq 0,6.s_{cl,\,t\,max}} \qquad [6.17]$$



h = plus grande dimension de la section transversale.

32. EC 2 – 9.5.3 (4) ii
33. EC 2 – 9.5.3 (4)

5. Coffrage

La formule de l'effort normal ultime limite donne :

$$A_c \geq \frac{N_{Ed}}{f_{cd} + \frac{A_s}{A_c}\sigma_s}$$

avec :

$$\sigma_s = \begin{cases} f_{yd} = \dfrac{f_{yk}}{\gamma_s} \text{ si } \varepsilon_{c2} > \dfrac{f_{yd}}{E_s} \\ E_s.\varepsilon_{c2} \quad \text{sinon} \end{cases}$$

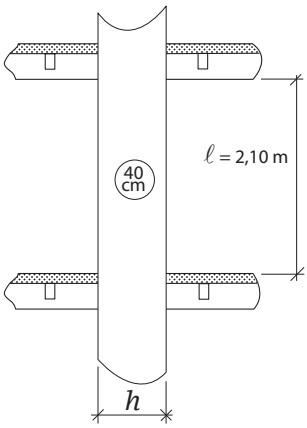
On peut adopter par exemple : $A_s / A_c = 1\ \%$, ce qui conduit à la formule :

$$\boxed{A_c \geq \frac{N_{Ed}}{f_{cd} + \frac{\sigma_s}{100}}} \qquad [6.18]$$

II. APPLICATION

Application : poteau – coffrage et armatures

–Énoncé–



Actions sous plancher supérieur :

- permanentes : $N_G = 1\ 390$ kN ;
- variables : $N_Q = 1\ 000$ kN ;
- poids propre du poteau négligeable.

Poteau non intégré au contreventement.

Matériaux :

- béton C25/30 : $f_{ck} = 25$ MPa ;
- aciers : S 500 ;
- enrobage des armatures : $c_{nom} = 3$ cm.

On se propose :

1/ de déterminer le coffrage du poteau ;

2/ de calculer les armatures longitudinales et transversales.

–Corrigé–

1. Caractéristiques des matériaux

1.1 Béton

$$f_{cd} = \alpha_{cc}\frac{f_{ck}}{\gamma_b} \quad (\alpha_{cc} = 1) \qquad f_{cd} = 1\frac{25}{1,5} = 16,7 \text{ MPa}$$

1.2 Aciers

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \qquad f_{yd} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ MPa}$$

2. Sollicitation à l'état limite ultime

$$N_{Ed} = 1,35.N_G + 1,5.N_Q \qquad N_{Ed} = 1,35.1\,390 + 1,5.1\,000$$

$$N_{Ed} = 3\,377 \text{ kN} = 3,38 \text{ MN}$$

3. Coffrage

3.1 Section minimale transversale

3.1.1 Longueur de flambement

En supposant le poteau moins raide que les poutres du plancher, nous pouvons considérer qu'il est encastré à ses deux extrémités : $k_1 = k_2 = 0,10$

$$l_0 = 0,5.l\sqrt{\left(1+\frac{k_1}{0,45+k_1}\right).\left(1+\frac{k_2}{0,45+k_2}\right)}$$

$$l_0 = 0,5.l.\left(1+\frac{0,1}{0,45+0,1}\right) = 0,59.l = 0,59.2,10 = 1,24 \text{ m}$$

3.1.2 Élancement en supposant que h > 40 cm

$$\left.\begin{array}{l}\text{section}\\ \text{rectangulaire}\end{array}\right\} \Rightarrow \lambda = \frac{l_0\sqrt{12}}{b} \qquad \lambda = \frac{124\sqrt{12}}{40} = 10,74$$

3.1.3 Type de calcul

$$\lambda = \frac{l_0}{i} >< \lambda_{lim} = \frac{20.A.B.C}{\sqrt{n}}$$

avec :

$A = \frac{1}{1 + 0,2.\varphi_{ef}} = 0,7$ si φ_{ef} est inconnu : φ_{ef} inconnu $\Rightarrow$ $A = 0,7$

$B = \sqrt{1 + 2.\omega} = 1,1$ si ω est inconnu : ω inconnu $\Rightarrow$ $B = 1,1$

$C = 1,7 - r_m = 0,7$ si r_m est inconnu : r_m inconnu $\Rightarrow$ $C = 0,7$

$n = \frac{N_{Ed}}{A_c.f_{cd}} =$ effort normal réduit : $h > b$ étant inconnu, nous supposerons le poteau carré :

$$n = \frac{3,38}{0,40^2.16,7} = 1,26$$

$$\lambda = 10,74 > 9,60 = \lambda_{lim} = \frac{20.0,7.1,1.0,7}{\sqrt{1,26}}$$

L'écart étant faible, nous ne tiendrons pas compte des effets du second ordre (voir § 4.3).

$$\frac{l}{h} >< 3 \quad \frac{210}{40} = 5,25 > 3 \text{ O.K.}$$

$\Rightarrow$ calcul en compression simple

3.1.4 Contrainte des armatures

Béton C25/30 $\Rightarrow$ $\varepsilon_{c2} = 2$ ‰

$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$

Aciers S 500 $\Rightarrow$ $f_{yd} = \frac{500}{1,15} = 435$ MPa

$$\frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{435}{2.10^5} = 2,17 \text{ ‰} > 2 \text{ ‰} = \varepsilon_{c2}$$

$$\sigma_s = \begin{cases} f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \text{ si } \varepsilon_{c2} > \frac{f_{yd}}{E_s} \\ E_s.\varepsilon_{c2} \quad \text{sinon} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \quad \sigma_s = E_s.\varepsilon_{c2} = 2.10^5.2.10^{-3} = 400 \text{ MPa}$$

3.1.5 Section réelle calculée

$$A_c \geq \frac{N_{Ed}}{f_{cd} + \frac{\sigma_s}{100}} \qquad A_c \geq \frac{3,38}{16,7 + \frac{400}{100}} = 0,1633 \text{ m}^2$$

Valeur de h :

$$A_c = a.h \quad \Rightarrow \quad h = \frac{A_c}{a} \qquad h \geq \frac{0,1633}{0,40} = 0,41 \text{ m}$$

3.1.6 Conclusion

h = 41 cm > b = 40 cm et l'hypothèse faite pour le calcul de l'élancement est correcte.

h >< 4.b h = 41 cm < 160 cm = 4.40 O.K.

3.2 Retenu

$$\Rightarrow \quad \boxed{b=0,45 \text{ m}}$$

$$\boxed{\text{Poteau } 45 \times 40 \text{ cm}^2}$$

4. Armatures longitudinales

4.1 Section résistante

Effort normal agissant :

- plancher supérieur : 3,377 MN
- poids propre poteau $1,35.\varpi.b.h.l$: $1,35.25.10^{-3}.0,40.0,45.2,10 =$ 0,013 MN

- effort normal de calcul : $N_{Ed} = 3,390$ MN

Le béton équilibre :

$$F_c = A_c.f_{cd} \qquad F_c = 0,40.0,45.16,7 = 3,01 \text{ MN}$$

Les aciers équilibrent :

$$F_s = N_{Ed} - F_c \qquad F_s = 3,39 - 3,01 = 0,380 \text{ MN}$$

D'où leur section :

$$A_s = \frac{F_s}{\sigma_s} \qquad A_s = \frac{0,380}{400} 10^4 = 9,50 \text{ cm}^2$$

4.2 Sections extrêmes

$$A_{s,\ min} = \text{Max}\begin{cases}\dfrac{0,10.N_{Ed}}{f_{yd}}\\ 0,2\dfrac{A_c}{100}\end{cases}$$

$$A_{s,\ min} = 7,79\ cm^2 = \text{Max}\begin{cases}0,10\dfrac{3,39}{435}10^4 = 7,79\ cm^2\\ 0,2\dfrac{40.45}{100} = 3,60\ cm^2\end{cases}$$

$$A_{s,\ max} = 4\frac{A_c}{100} \qquad A_{s,\ max} = 4\frac{40.45}{100} = 72\ cm^2$$

$$A_{s,\ min} \le A_s \le A_{s,\ max}$$

$$A_{s,\ min} = 7,79\ cm^2 < A_s = 9,50\ cm^2 < A_{s,\ max} = 72\ cm^2$$

4.3 Retenu

ϕ >< ϕ_{min} = 8 mm

Prenons : ϕ = 20 mm > ϕ_{min} = 8 mm

$\boxed{4\ \phi\ 20\ HA}$ 4.3,14 = 12,56 cm²

9,50 cm² < A = 12,56 cm²

En vérifiant :

$\frac{l}{h}$ >< 3 $\qquad \frac{210}{45} = 4,67 > 3$ O.K.

h >< 4.b $\qquad$ h = 45 cm < 160 cm = 4.40 O.K.

$$\lambda = \frac{l_0}{i} >< \lambda_{lim} = \frac{20.A.B.C}{\sqrt{n}}$$

avec :

$$A = \frac{1}{1 + 0,2.\varphi_{ef}} = 0,7 \text{ si } \varphi_{ef} \text{ est inconnu : } \quad \varphi_{ef} \text{ inconnu } \Rightarrow \ A = 0,7$$

$$\omega = \frac{A_s.f_{yd}}{A_c.f_{cd}} = \text{pourcentage mécanique}$$

d'armatures : $\qquad \omega = \dfrac{12,56.435}{40.45.16,7} = 0,182$

$B = \sqrt{1 + 2.\omega} = 1{,}1$ si ω est inconnu : $B = \sqrt{1 + 2.0{,}182} = 1{,}17$

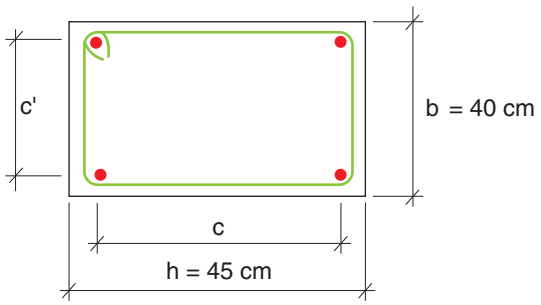
$C = 1{,}7 - r_m = 0{,}7$ si r_m est inconnu : r_m inconnu $\Rightarrow$ $C = 0{,}7$

$n = \dfrac{N_{Ed}}{A_c.f_{cd}}$ = effort normal réduit : $n = \dfrac{3{,}39}{0{,}40.0{,}45.16{,}7} = 1{,}128$

$$\lambda = 10{,}74 < 10{,}80 = \lambda_{lim} = \frac{20.0{,}7.1{,}17.0{,}7}{\sqrt{1{,}128}} \text{ O.K.}$$

5. Armatures transversales

5.1 Choix des armatures transversales



$$\phi_t \geq \text{Max}\begin{cases} 6 \text{ mm} \\ \dfrac{\phi_{l,\,max}}{4} \end{cases} \qquad \phi_t \geq 6 \text{ mm} = \text{Max}\begin{cases} 6 \text{ mm} \\ \dfrac{20}{4} = 5 \text{ mm} \end{cases} \Rightarrow \phi_t = 8 \text{ mm}$$

5.2 Espacement en zone courante

$$s_{cl,\,t\,max} = \text{Min}\begin{cases} 20.\phi_{l,\,min} \\ b \\ 400 \text{ mm} \end{cases} \qquad s_{cl,\,t\,max} = 400 \text{ mm} = \text{Min}\begin{cases} 20.20 = 400 \text{ mm} \\ b = 400 \text{ mm} \\ 400 \text{ mm} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \boxed{1 \text{ cadre } \phi\,8 \text{ HA} : s_{cl,\,t} = 40 \text{ cm}}$$

5.3 Zone de recouvrements

On arrête tous les aciers longitudinaux dans la même section.

5.3.1 Contrainte ultime d'adhérence

$f_{bd} = 2{,}25.\eta_1.\eta_2.f_{ctd}$

avec :

$$\eta_1 = \begin{cases} 1 : \text{bonnes conditions d'adhérence,} \\ 0,7 : \text{conditions d'adhérence médiocres,} \end{cases}$$

Armatures longitudinales du poteau verticales, donc parallèles à la direction du bétonnage ($\alpha = 90^\circ$ sur les figures du § 3.2, chapitre 4 : « Dispositions constructives »). D'où les conditions de bétonnage des armatures longitudinales sont bonnes $\Rightarrow \quad \eta_1 = 1$

$$\eta_2 = \begin{cases} 1 : \phi \leq 32 \text{ mm,} \\ \dfrac{132 - \phi}{100} : \phi > 32 \text{ mm.} \end{cases}$$

$\phi = 20 \text{ mm} < 32 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad \eta_2 = 1$

$f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad \Rightarrow \quad f_{ctm} = 0,3\left[f_{ck}\right]^{2/3}$ $\quad f_{ctm} = 0,3\left[25\right]^{2/3} = 2,56 \text{ MPa}$

$f_{ctk,\,0,05} = 0,7.f_{ctm}$ $\quad f_{ctk,\,0,05} = 0,7.2,56 = 1,79 \text{ MPa}$

$f_{ctd} = \alpha_{ct} \dfrac{f_{ctk,\,0,05}}{\gamma_s}$ $\quad f_{ctd} = 1\dfrac{1,79}{1,5} = 1,19 \text{ MPa}$

$f_{bd} = 2,25.1.1.1,19 = 2,68 \text{ MPa}$

5.3.2 Longueur d'ancrage requise

$A_{s,\,req}$ = section d'aciers calculée $\quad A_{s,\,req} = 9,50 \text{ cm}^2$

$A_{s,\,prov}$ = section d'aciers réelle $\quad A_{s,\,prov} = 12,56 \text{ cm}^2$

$\sigma_{sd} = \dfrac{F_s}{A}$ = contrainte de calcul à l'origine du recouvrement

$$\sigma_{sd} = \frac{0,380}{12,56.10^{-4}} = 303 \text{ MPa}$$

$l_{b,\,rqd} = \dfrac{\phi}{4} . \dfrac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$ $\quad l_{b,\,rqd} = \dfrac{\phi}{4} . \dfrac{303}{2,68} = 28,26.\phi$

5.3.3 Longueur de recouvrement

$$l_0 = \text{Max} \begin{cases} \alpha_4.\alpha_6.l_{b,\,rqd} \\ 15.\phi \\ 200 \text{ mm} \end{cases}$$

avec :

α_4, fonction du confinement par des armatures transversales soudées :
armatures sans soudure $\Rightarrow \quad \alpha_4 = 1$

$$\alpha_6 = \sqrt{\frac{\rho_1}{25}} \in [1\,;1{,}5]$$

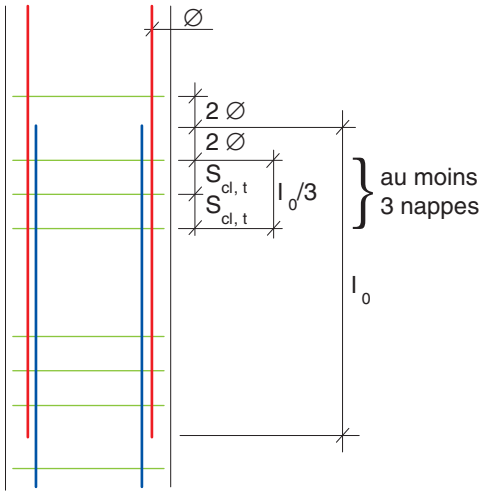
$\rho_1 = 100\ \%$ (toutes les barres sont en recouvrement dans la même section)

$$\Rightarrow \quad \alpha_6 = \sqrt{\frac{100}{25}} = 2 > 1{,}5 \quad \Rightarrow \quad \alpha_6 = 1{,}5$$

$$l_0 = 84{,}78 \text{ cm} = \text{Max} \begin{cases} 1.1,5.28,26.\phi = 42,39.\phi = 42,39.2 = 84,78 \text{ cm} \\ 15.2 = 30 \text{ cm} \\ 200 \text{ mm} \end{cases}$$

soit $l_0 = 85$ cm.

Nappes aux extrémités des recouvrements :



$\Rightarrow$ recouvrement des ϕ 20 (3 nappes d'armatures transversales à chaque extrémité du recouvrement et une quatrième nappe hors recouvrement) :

$$s_{cl,\,t} = \frac{85/3}{2} = 14{,}2 \text{ cm}$$

$\boxed{\text{soit : } s_{cl,\,t} = 14 \text{ cm}} \quad < \quad 40$ cm $= s_{cl,\,t}$ en zone courante.

vérification de l'espacement le plus proche de l'extrémité du recouvrement :

$\boxed{s_{cl,\,t} = 14 \text{ cm} < 150 \text{ mm O.K.}}$

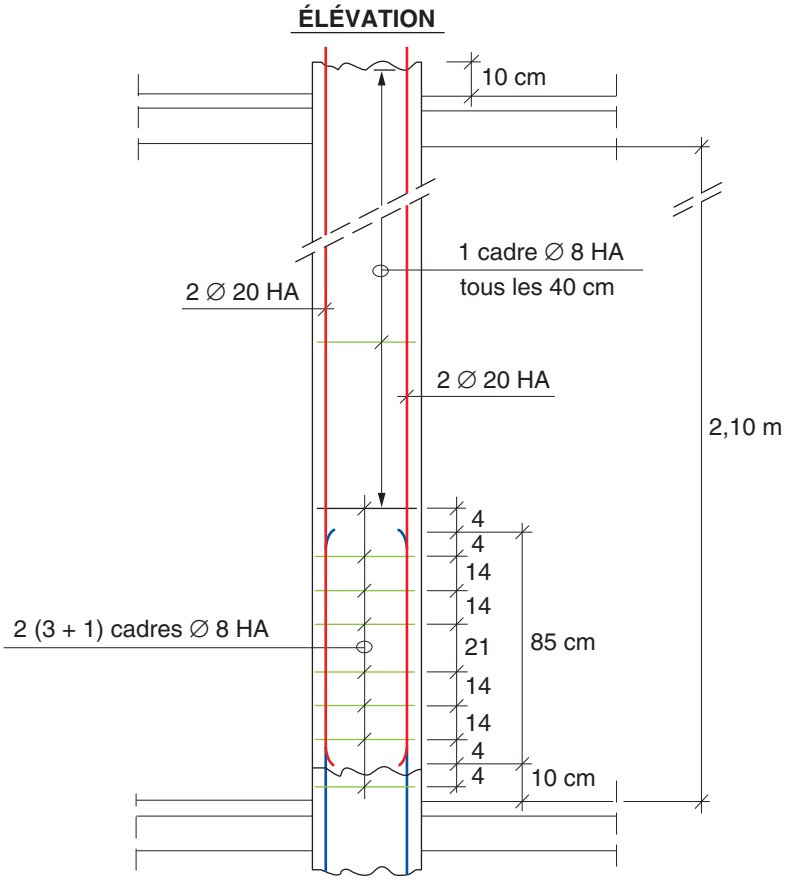
Distance entre les groupes de 3 nappes :

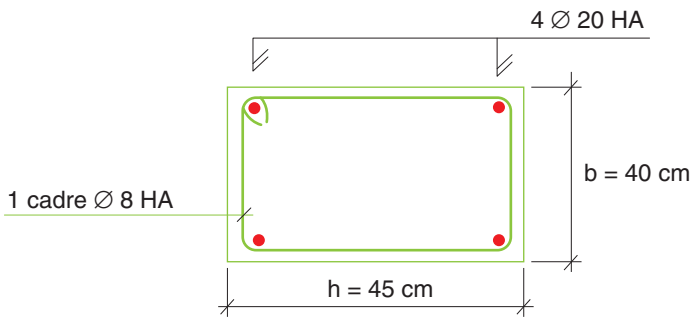
$$l_0 - 4.s_{cl,\,t} - 4.\phi = 85 - 4.14 - 4.2 = 21 \text{ cm}$$

$\phi > 14$ mm $\Rightarrow$ vérification de l'espacement :

$s_{cl,\,t} >< 0{,}6.s_{cl,\,t\,max}$ $\quad \boxed{s_{cl,\,t} = 14 \text{ cm} < 24 \text{ cm} = 0{,}6.40 = 0{,}6.s_{cl,\,t\,max} \text{ O.K.}}$

6. Schéma de ferraillage





7 Flexion simple

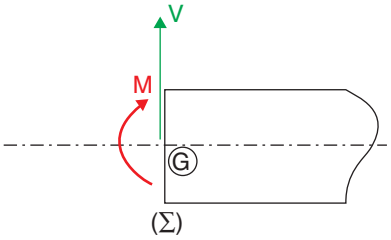
I. RAPPELS THÉORIQUES

1. Introduction

1.1 Définitions

Une poutre à plan moyen est sollicitée en flexion plane simple lorsque l'ensemble des forces et couples appliqués à gauche d'une section droite Σ est réductible, au centre de gravité G de Σ, à :

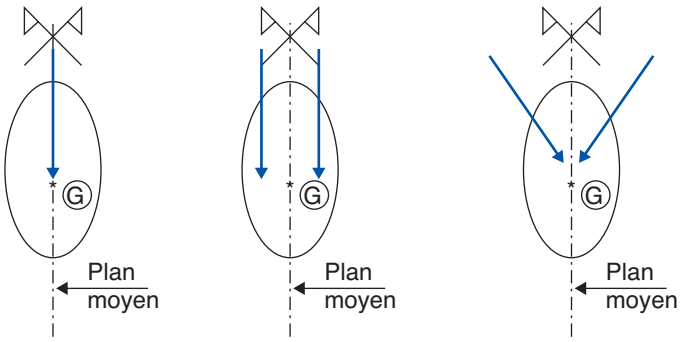
- un couple M d'axe perpendiculaire au plan moyen (ou moment fléchissant) ;
- une force V située dans le plan de Σ et dans le plan moyen (ou effort tranchant).



Ceci revient à dire :

1/ que les forces extérieures appliquées sont :

- soit dans le plan moyen et normales à la ligne moyenne ;
- soit dans des plans symétriques par rapport au plan moyen et normales à la ligne moyenne ;



2/ que les couples extérieurs appliqués ont leurs axes perpendiculaires au plan moyen.

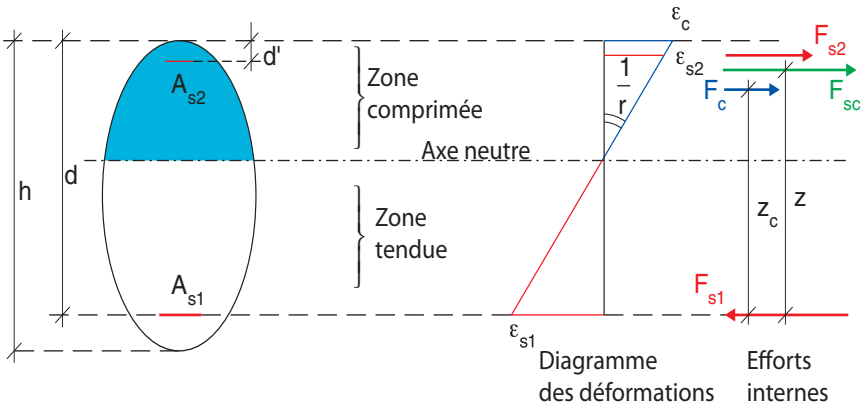
Les effets du moment fléchissant M et ceux de l'effort tranchant V sont étudiés séparément. Le présent chapitre est consacré à l'étude des effets du moment fléchissant M. Pour l'étude de l'effort tranchant V se reporter au chapitre 8 : « Effort tranchant ».

1.2 Données générales

1.2.1 Notations et terminologie

Considérons une poutre fléchie à axe horizontal.

- si M > 0 : la partie supérieure de la section est comprimée, la partie inférieure est tendue ;



- si M < 0 : c'est l'inverse.

On pose :

A_{s1} = aire des armatures tendues,

A_{s2} = aire des armatures comprimées éventuelles,

h = hauteur totale de la section droite,

d' = distance du centre de gravité de A_{s2} à la fibre de béton la plus comprimée,

F_c = résultante des efforts de compression dans le béton,

F_{s2} = résultante des efforts de compression dans les aciers comprimés,

$F_{sc} = F_c + F_{s2}$

F_{s1} = résultante des efforts de traction dans les armatures tendues.

On appelle :

- hauteur utile : d = distance du centre de gravité des armatures tendues à la fibre la plus comprimée ;
- bras de levier : z = distance entre F_{sc} et F_{s1} ; z_c = distance entre F_c et F_{s1}
- axe neutre : AN = axe des déformations (ou des contraintes) nulles.

1.2.2 Principes généraux de calcul

1.2.2.1 État limite ultime

Moment agissant ultime :

$$M_{Ed} = \sum_i \gamma_i . M_i$$

Le diagramme des déformations passe :

- soit par le pivot A ;
- soit par le pivot B ;

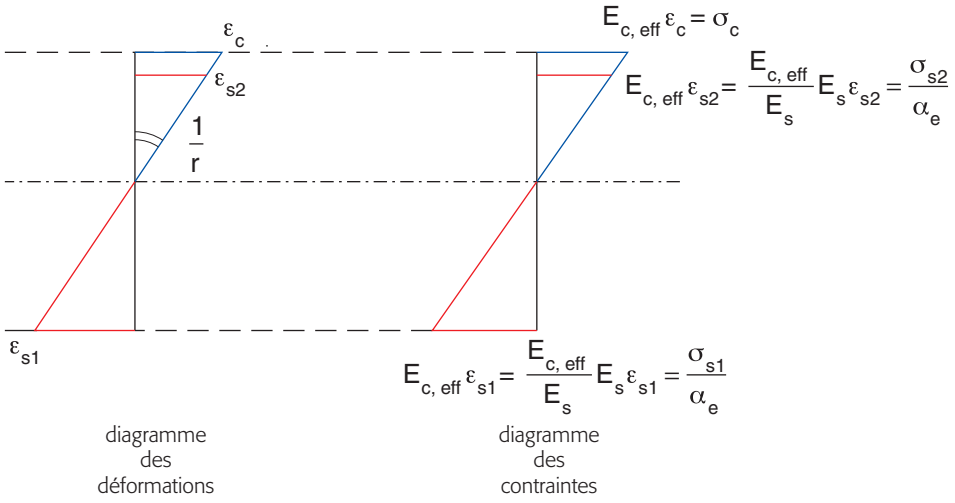
mais pas par le pivot C (sinon, la section serait entièrement comprimée, ce qui est en contradiction avec les hypothèses de la flexion simple).

1.2.2.2 États limites de service

Moment agissant de service :

$$M_{ser} = \sum_i M_i$$

Le diagramme des contraintes est linéaire (diagramme de Navier) :



1.2.3 Équations générales

Pour résoudre tout problème de flexion simple, soit à l'état limite ultime, soit à l'état limite de service, on dispose en tout et pour tout de trois équations :

- deux équations de la statique :
  - équilibre des forces ;
  - équilibre des moments ;
- une équation de « compatibilité » exprimant la conservation des sections planes (relations de triangles semblables) :
  - par les déformations dans le cas de l'ELU ;
  - par les contraintes dans le cas de l'ELS.

Il ne peut donc y avoir plus de 3 inconnues. Dans le cas contraire, pour n inconnues, il faut se fixer n – 3 conditions supplémentaires.

1.2.3.1 Équilibre des forces

La résistance à la traction du béton tendu étant négligée, les efforts de traction doivent être intégralement équilibrés par les armatures tendues.

En flexion simple, il n'y a aucun effort normal extérieur. La résultante des forces internes :

- de compression F_{sc} ;
- et de traction F_{s1} ;

doit être nulle :

$$F_{s1} = F_{sc} = \left(F_c + F_{s2}\right) \qquad [7.1]$$

1.2.3.2 Équilibre des moments

Le couple formé par les forces internes F_{sc} et F_{s1} doit équilibrer le moment extérieur agissant M :

$$M = F_{sc}.z = F_{s1}.z \qquad [7.2]$$

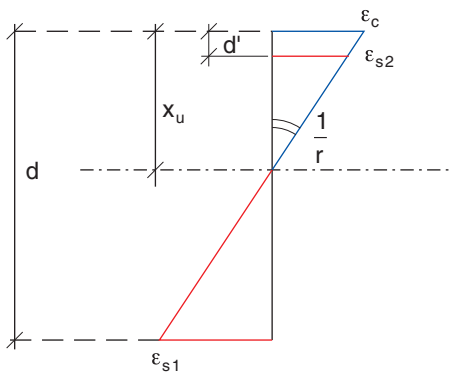
Remarque

M = M_{Ed} ou M_{ser} suivant que l'on se trouve à l'ELU ou à l'ELS.

1.2.3.3 Équations de compatibilité

a)État limite ultime

En désignant par x_u la « hauteur » de l'axe neutre à partir de la fibre la plus comprimée.



On peut écrire, puisque le diagramme des déformations est linéaire :

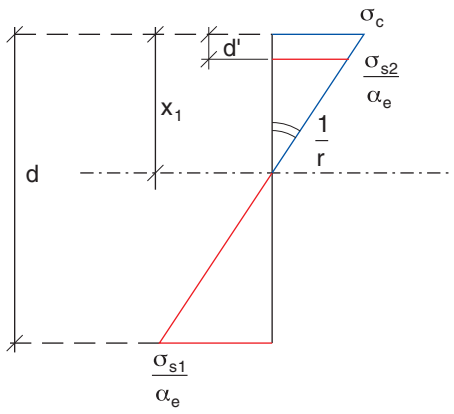
$$\frac{\varepsilon_c}{x_u} = \frac{\varepsilon_{s2}}{x_u - d'} = \frac{\varepsilon_{s1}}{d - x_u} \qquad [7.3a]$$

Au pivot A : $\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{ud}$ ou ∞ suivant le diagramme σ–ε d'acier utilisé $\Rightarrow$ ε_{s2} et ε_c.

Au pivot B : $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu2}$ ou ε_{cu3} suivant le diagramme σ–ε de béton utilisé $\Rightarrow$ ε_{s2} et ε_{s1}.

b) État limite de service

En désignant par x_1 la « hauteur » de l'axe neutre à partir de la fibre la plus comprimée.



On peut écrire, puisque le diagramme des contraintes est linéaire :

$$\frac{\sigma_c}{x_1} = \frac{\sigma_{s2}}{\alpha_e (x_1 - d')} = \frac{\sigma_{s1}}{\alpha_e (d - x_1)} \qquad [7.3b]$$

À l'état limite de service avec limitation de la contrainte de compression du béton :

$\sigma_c = \overline{\sigma_c} \Rightarrow \sigma_{s2}$ et σ_{s1}

À l'état limite de service avec limitation de la contrainte de traction des aciers tendus :

$\sigma_{s1} = \overline{\sigma_s} \Rightarrow \sigma_{s2}$ et σ_c

2. Section rectangulaire sans aciers comprimés

La méthode de calcul due à Jean Perchat, développée dans la suite, s'applique aux sections avec ou sans aciers comprimés.

2.1 Dimensionnement à l'état limite ultime

2.1.1 Coefficients de remplissage et de centre de gravité

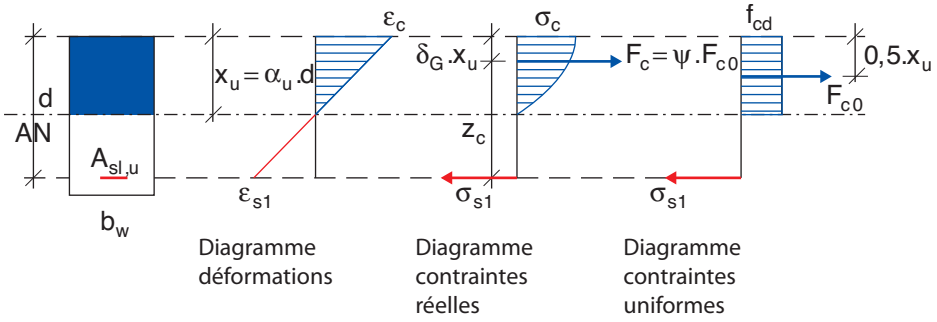
Dans une section rectangulaire $b_w.d$ (largeur b_w, hauteur utile d), on pose :

F_c = résultante des efforts de compression dans la zone de béton comprimé,

z_c = bras de levier de F_c par rapport au centre de gravité des aciers tendus (= bras de levier du béton seul),

F_{c0} = résultante des efforts de compression dans la zone de béton comprimé sous une contrainte uniforme égale à $f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$ [1] :

$$F_{c0} = b_w.x_u.f_{cd} \qquad [7.4]$$



1. EC 2 – 3.1.7 (3)

On appelle :

- coefficient de remplissage ψ, le rapport :

$$\psi = \frac{F_c}{F_{c0}} \qquad [7.5]$$

- coefficient de centre de gravité δ_G, le coefficient qui fixe la distance $\delta_G.x_u$ de F_c à la fibre la plus comprimée.

On peut donc écrire :

$$\begin{cases} F_c = \psi.F_{c0} = \psi.b_w.x_u.f_{cd} \\ z_c = d - \delta_G.x_u \end{cases}$$

D'où l'expression générale du moment des forces internes :

$$M_{Ed} = F_c.z_c = \psi.b_w.x_u.f_{cd}\left(d - \delta_G.x_u\right)$$

que l'on écrit sous la forme :

$$M_{Ed} = \psi.b_w.d^2.f_{cd}\,\frac{x_u}{d}\left[1 - \delta_G.\frac{x_u}{d}\right]$$

D'où en posant :

$$\alpha_u = \frac{x_u}{d}$$

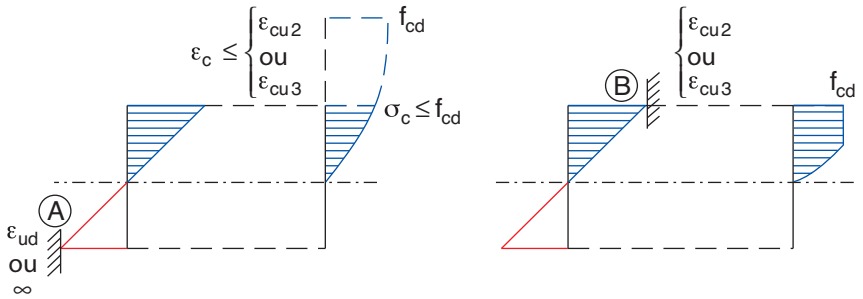
$$\mu_c = \frac{M_{Ed}}{b_w.d^2.f_{cd}} = \textbf{Moment réduit} \qquad [7.6]$$

il vient :

$$\mu_c = \psi.\alpha_u\left(1 - \delta_G.\alpha_u\right) \qquad [7.7]$$

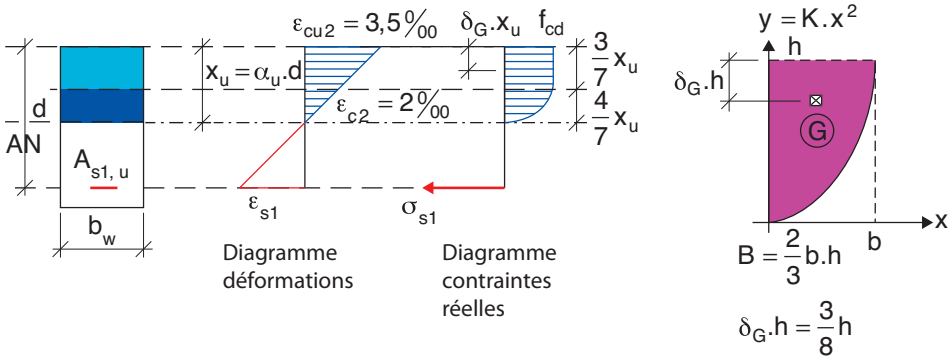
2.1.2 Diagramme parabole-rectangle et rectangulaire simplifié

2.1.2.1 Diagramme parabole-rectangle



Pivot *A* **Pivot *B***

- Si le pivot est A, ψ et δ_G dépendent de α_u. Leurs expressions sont assez compliquées.
- Si le pivot est B :
  - lorsque l'on utilise le diagramme parabole-rectangle, il est entièrement mobilisé et l'on a pour $f_{ck} \leq 50$ MPa :



Élément de hauteur	F_c $\left(b_w.x_u.f_{cd}\right)$	δ $\left(x_u\right)$	$F_c.\delta$ $\left(b_w.x_u^2.f_{cd}\right)$
$\frac{4}{7}x_u$	$\frac{2}{3}b_w\frac{4}{7}x_u.f_{cd} = \frac{8}{21}$	$\left(\frac{3}{7}+\frac{3}{8}.\frac{4}{7}\right) = \frac{9}{14}$	$\frac{72}{294}$
$\frac{3}{7}x_u$	$1.b_w\frac{3}{7}x_u.f_{cd} = \frac{3}{7}$	$\frac{1}{2}.\frac{3}{7} = \frac{3}{14}$	$\frac{9}{98}$
Σ	$\frac{17}{21} = 0{,}8095 = \psi$		$\frac{99}{294}$

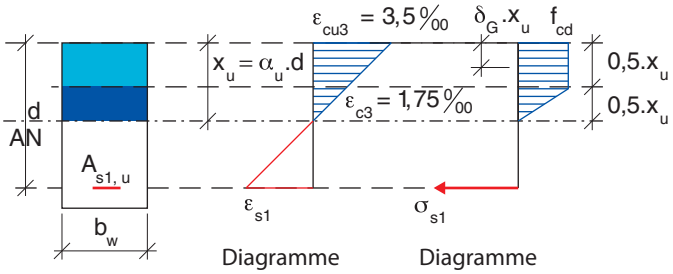
$$\Rightarrow \quad \delta_G.x_u = \frac{\frac{99}{294}}{\frac{17}{21}}.x_u = 0{,}41597.x_u$$

donc :

$\psi = 0{,}81$,

$\delta_G = 0{,}416$.

– lorsque l'on utilise le diagramme bi-linéaire, il est entièrement mobilisé et l'on a pour $f_{ck} \leq 50$ MPa :



Élément	F_c $\left(b_w.x_u.f_{cd}\right)$	δ $\left(x_u\right)$	$F_c.\delta$ $\left(b_w.x_u^2.f_{cd}\right)$
Inférieur	$\frac{1}{2} b_w \frac{1}{2} x_u.f_{cd} = \frac{1}{4}$	$\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3}.\frac{1}{2}\right) = \frac{4}{6}$	$\frac{1}{6}$
Supérieur	$1.b_w \frac{1}{2} x_u.f_{cd} = \frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}.\frac{1}{2} = \frac{1}{4}$	$\frac{1}{8}$
Σ	$\frac{3}{4} = 0{,}75 = \psi$		$\frac{7}{24}$

$$\Rightarrow \quad \delta_G.x_u = \frac{\frac{7}{24}}{\frac{3}{4}}.x_u = 0{,}389.x_u$$

donc :

$\psi = 0{,}75$,

$\delta_G = 0{,}389$.

2.1.2.2 Diagramme rectangulaire simplifié

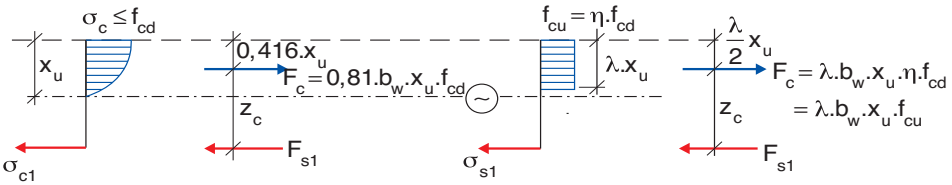


Diagramme parabole-rectangle — Forces internes — Diagramme rectangulaire — Forces internes

On démontre que, lorsque le pivot est A ou B, on peut substituer au diagramme parabole rectangle un diagramme rectangulaire[2] :

- de largeur égale à $f_{cu} = \eta.f_{cd} = \eta.\alpha_{cc}\frac{f_{ck}}{\gamma_c}$, [7.8] ;
- de hauteur égale à $\lambda.x_u$ depuis la fibre la plus comprimée,

pour lequel on a :

$$\psi = \lambda.\eta,$$

$$\delta_G = \frac{\lambda}{2}\ .$$

Les coefficients λ et η ont pour valeur (f_{ck} en MPa) :

$$\lambda = \begin{cases} 0,8 \text{ si } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} & (3,19) \\ 0,8 - \dfrac{f_{ck} - 50}{400} \text{ si } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} & (3.20) \end{cases} \quad [7.9]$$

$$\eta = \begin{cases} 1,0 \text{ si } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} & (3,21) \\ 1,0 - \dfrac{f_{ck} - 50}{200} \text{ si } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} & (3.22) \end{cases} \quad [7.10]$$

Dans ce cas, le moment réduit a pour expression :

$$\mu_c = \frac{M_c}{b_w.d^2.f_{cd}} = \lambda.\eta.\alpha_u\left(1 - \frac{\lambda}{2}\alpha_u\right) \quad \Rightarrow$$

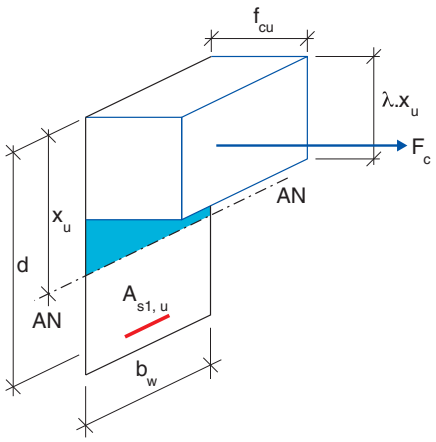
$$\mu_{cu} = \frac{M_{Ed}}{b_w.d^2.f_{cu}} = \lambda.\alpha_u\left(1 - \frac{\lambda}{2}\alpha_u\right) \quad [7.11]$$

2. EC 2 – 3.1.7 (3)

Remarque

La force de compression dans le béton vaut :

$F_c = \lambda.b_w.x_u.f_{cu}$ [7.12]



Elle est mesurée par le volume d'un parallélépipède de côtés :

b_w, $\lambda.x_u$, et f_{cu},

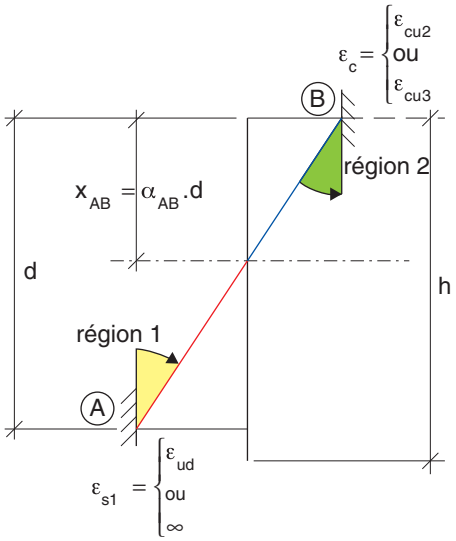
appelé « volume des contraintes ».

2.1.3 Moment frontière M_{AB}

Si l'on veut connaître à l'avance le pivot, il faut calculer le moment de flexion M_{AB} au centre de gravité de l'armature inférieure correspondant à un diagramme de déformation passant par :

$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{ud}$ ou ∞ (suivant le diagramme σ–ε d'aciers utilisé) pour les aciers tendus ;

$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu2}$ ou ε_{cu3} (suivant le diagramme σ–ε de béton utilisé) pour le béton le plus comprimé.



$$\alpha_{AB} = \frac{x_{AB}}{d} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_{s1}} \qquad [7.13]$$

d'où :

$$\mu_{AB} = \lambda.\alpha_{AB}\left(1 - \frac{\lambda}{2}.\alpha_{AB}\right) \qquad [7.14]$$

On obtient ainsi dans le cas du diagramme σ–ε à palier incliné (dans les cases comportant trois valeurs, le chiffre du haut correspond aux aciers de classe de ductilité A, le chiffre intermédiaire à la classe B et le chiffre inférieur à la classe C) :

Classe de résistance du béton	≤ C50/60	C55/67	C60/75	C70/85	C80/95	C90/105
$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu2} = \varepsilon_{cu3}$ (‰)	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,6
$\varepsilon_{ud} = 0,9.\varepsilon_{uk}$ (‰) (valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française)[3]	22,5 45 67,5					
$\alpha_{AB} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_{s1}}$	0,1346 0,0722 0,0493	0,1211 0,0644 0,0439	0,1142 0,0605 0,0412	0,1071 0,0566 0,0385	0,1036 0,0546 0,0371	0,1036 0,0546 0,0371
$\lambda = 0,8$ ou $0,8 - \frac{f_{ck} - 50}{400}$	0,8	0,7875	0,7750	0,7500	0,7250	0,7000
$\mu_{AB} = \lambda.\alpha_{AB}\left(1 - \frac{\lambda}{2}.\alpha_{AB}\right)$	0,1019 0,0561 0,0387	0,0908 0,0494 0,0340	0,0846 0,0458 0,0314	0,0771 0,0415 0,0285	0,0723 0,0388 0,0265	0,0699 0,0375 0,0256

On en déduit :

$$\mu_{AB} = \frac{M_{AB}}{b_w.d^2.f_{cu}} \quad \Rightarrow \quad M_{AB} = \mu_{AB}.b_w.d^2.f_{cu} \qquad [7.15]$$

D'où :

$M_{Ed} \leq M_{AB} \quad (\Leftrightarrow \mu_{cu} \leq \mu_{AB}) \quad \Rightarrow$ on est au pivot A,

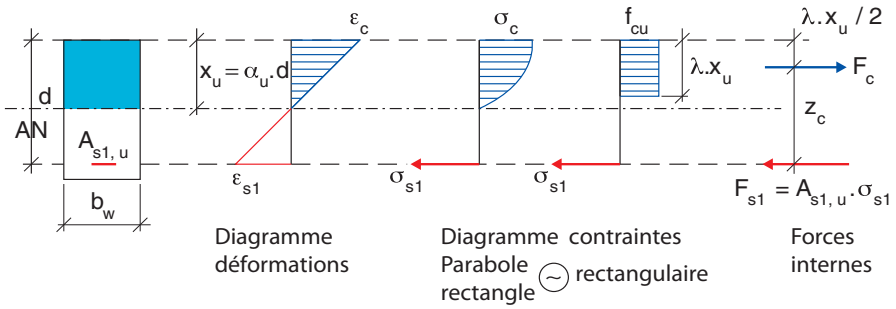
$M_{Ed} > M_{AB} \quad (\Leftrightarrow \mu_{cu} > \mu_{AB}) \quad \Rightarrow$ on est au pivot B.

Remarque

Lorsque $\varepsilon_{s1} = \infty$ (cas du diagramme σ–ε de l'acier à palier horizontal), $\alpha_{AB} \to 0$ et $\mu_{AB} \to 0$.

3. EC 2 – 3.2.7 (2b) note 1 + voir AN

2.1.4 Dimensionnement de $A_{s1,\,u}$ à l'ELU



Équations d'équilibre :

$$F_c = b_w.\lambda.x_u.f_{cu}$$

$$z_c = \left(d - \frac{\lambda}{2}\,x_u\right) \qquad [7.16]$$

$$M_{Ed} = F_c.z_c \quad \Rightarrow \quad M_{Ed} = b_w.\lambda.x_u.f_{cu}\left(d - \frac{\lambda}{2}\,x_u\right)$$

$$M_{Ed} = A_{s1,\,u}.\sigma_{s1}.z_c$$

En posant :

$$\mu_{cu} = \frac{M_{Ed}}{b_w.d^2.f_{cu}} \text{ et } \alpha_u = \frac{x_u}{d}$$

on obtient :

$$\mu_{cu} = \lambda.\alpha_u\left(1 - \frac{\lambda}{2}\,\alpha_u\right) \text{ et } A_{s1,\,u} = \frac{M_{Ed}}{z_c.\sigma_{s1}}$$

et par résolution de cette équation du deuxième degré en α :

$$\alpha_u = \frac{1}{\lambda}\left(1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{cu}}\right) \qquad [7.17]$$

2.1.5 Méthode de calcul dans le cas d'un diagramme d'acier à palier incliné

$$\eta = \begin{cases} 1,0 \text{ si } f_{ck} \le 50 \text{ MPa} \\ 1,0 - \dfrac{f_{ck} - 50}{200} \text{ si } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \le 90 \text{ MPa} \end{cases} \quad (f_{ck} \text{ en MPa}) \Rightarrow \quad f_{cu} = \eta.\alpha_{cc}\,\frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

$$\Rightarrow \quad \mu_{cu} = \frac{M_{Ed}}{b_w.d^2.f_{cu}}$$

$$\Rightarrow \quad \lambda = \begin{cases} 0,8 \text{ si } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 0,8 - \dfrac{f_{ck} - 50}{400} \text{ si } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa } (f_{ck} \text{ en MPa}) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \quad \alpha_u = \frac{1}{\lambda}\left(1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{cu}}\right)$$

$$\Rightarrow \quad \mu_{AB} = \begin{cases} 0,1019 : \text{classe de ductilité A,} \\ 0,0561 : \text{classe de ductilité B,} \\ 0,0387 : \text{classe de ductilité C,} \end{cases}$$

ou valeurs tirées du tableau du § 2.1.3 si $f_{ck} > 50$ MPa

$$\Rightarrow \text{ si } \mu_{cu} \leq \mu_{AB} \Rightarrow \text{ Pivot A } \Rightarrow \quad \varepsilon_{s1} = \varepsilon_{ud} = \begin{cases} 22,5 / 1\,000 : \text{classe A,} \\ 45 / 1\,000 : \text{classe B,} \\ 67,5 / 1\,000 : \text{classe C.} \end{cases}$$

$\Rightarrow$ si $\mu_{cu} > \mu_{AB}$ $\Rightarrow$ Pivot B $\Rightarrow$ $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu2}$ ou ε_{cu3} (voir tableau § 2.2.4, chapitre 2 : « Matériaux »)

$$\Rightarrow \quad \varepsilon_{s1} = \varepsilon_c \frac{1 - \alpha_u}{\alpha_u}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_{s1} < \varepsilon_{yd} = \dfrac{f_{yd}}{E_s} \Rightarrow \sigma_{s1} = E_s.\varepsilon_{s1} \\ \varepsilon_{s1} \geq \varepsilon_{yd} = \dfrac{f_{yd}}{E_s} \Rightarrow \sigma_{s1} \text{ par les formules du § 2.4.2.1 du chapitre 3 : « Béton armé – Généralités »} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \quad z_c = d\left(1 - \frac{\lambda}{2}\alpha_u\right)$$

$$\Rightarrow \quad A_{s1,\,u} = \frac{M_{Ed}}{z_c.\sigma_{s1}} \qquad [7.18]$$

2.1.6 Méthode de calcul dans le cas d'un diagramme d'acier à palier horizontal

$$\eta = \begin{cases} 1,0 \text{ si } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 1,0 - \dfrac{f_{ck} - 50}{200} \text{ si } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases} \quad (f_{ck} \text{ en MPa}) \Rightarrow \quad f_{cu} = \eta.\alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

$$\Rightarrow \quad \mu_{cu} = \frac{M_{Ed}}{b_w.d^2.f_{cu}}$$

$$\Rightarrow \quad \lambda = \begin{cases} 0,8 \text{ si } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 0,8 - \dfrac{f_{ck} - 50}{400} \text{ si } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases} \quad (f_{ck} \text{ en MPa})$$

$$\Rightarrow \quad \alpha_u = \frac{1}{\lambda}\left(1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{cu}}\right)$$

$\Rightarrow \quad \mu_{cu} > \mu_{AB} = 0 \quad \Rightarrow$ Pivot B $\Rightarrow \quad \varepsilon_c = \varepsilon_{cu2}$ ou ε_{cu3} (voir tableau § 2.2.4, chapitre 2 : « Matériaux »)

$$\Rightarrow \quad \varepsilon_{s1} = \varepsilon_c \frac{1 - \alpha_u}{\alpha_u}$$

$$\Rightarrow \quad \begin{cases} \varepsilon_{s1} < \varepsilon_{yd} = \dfrac{f_{yd}}{E_s} \quad \Rightarrow \quad \sigma_{s1} = E_s.\varepsilon_{s1} \\ \varepsilon_{s1} \geq \varepsilon_{yd} = \dfrac{f_{yd}}{E_s} \quad \Rightarrow \quad \sigma_{s1} = f_{yd} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \quad z_c = d\left(1 - \frac{\lambda}{2}\,\alpha_u\right)$$

$$\Rightarrow \quad A_{s1,\,u} = \frac{M_{Ed}}{z_c.\sigma_{s1}} \qquad [7.18]$$

Remarque

Compte tenu de la forme des diagrammes σ–ε de l'acier, la section d'armatures obtenue à partir du diagramme à palier incliné est plus faible que celle obtenue avec le diagramme à palier horizontal.

La notion de moment limite ultime rend inutile la comparaison $\varepsilon_{s1} >< \varepsilon_{yd}$ et conduit à prendre :

- pour le diagramme de calcul σ–ε à palier horizontal : $\sigma_{s1} = f_{yd}$ sans calcul de ε_{s1},
- pour le diagramme de calcul σ–ε à palier incliné : les formules du § 2.4.2.1 du chapitre 3 : « Béton armé – Généralités », comme nous le verrons au § 2.3 ci-après.

2.2 Dimensionnement à l'état limite de service par compression du béton

2.2.1 Hypothèses

Pour des environnements de classes d'exposition XD, XF et XS, la contrainte maximale de compression du béton sous la combinaison d'actions caractéristiques est limitée à[4] :

$$\overline{\sigma_c} = k_1.f_{ck}$$

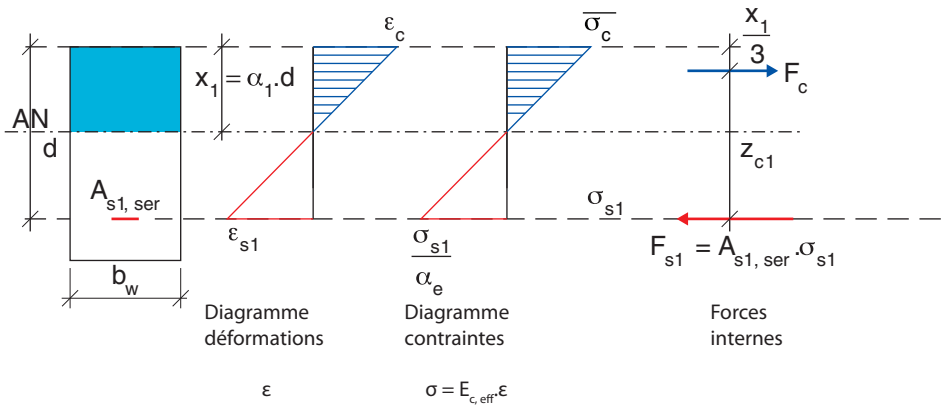
avec : $k_1 = 0,6$, valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[5].

Dans les cas courants ($f_{ck} \leq 50$ MPa et aciers S 500), la contrainte maximale de traction du béton en flexion simple est telle que :

$\sigma_{ct} > f_{ct,\,eff}$ (voir hypothèse H_3 au § 2.3.1 du chapitre 3 : « Béton armé – Généralités »)[6].

Nous négligerons donc, dans la suite, le béton tendu.

2.2.2 Dimensionnement de $A_{s1,\,ser}$ à l'ELS



Équations d'équilibre :

$$F_c = \frac{1}{2} b_w.x_1.\overline{\sigma_c}$$

$$z_{c1} = d - \frac{x_1}{3}$$

4. EC 2 – 7.2 (2)
5. EC 2 – voir AN
6. EC 2 – 7.1 (2)

$$M_{ser} = F_c.z_{c1} \quad \Rightarrow \quad M_{ser} = \frac{1}{2} b_w.x_1.\overline{\sigma_c}\left(d - \frac{x_1}{3}\right)$$

$$M_{ser} = A_{s1,\ ser}.\sigma_{s1}.z_{c1}$$

En posant

$$\mu_{ser} = \frac{M_{ser}}{b_w.d^2.\overline{\sigma_c}} \text{ et } \alpha_1 = \frac{x_1}{d}$$

on obtient :

$$\mu_{ser} = \frac{1}{2}\alpha_1\left(1 - \frac{\alpha_1}{3}\right) \text{ et } A_{s1,\ ser} = \frac{M_{ser}}{z_{c1}.\sigma_{s1}}$$

D'où par résolution de cette équation du second degré en α_1 :

$$\alpha_1 = 1{,}5\left(1 - \sqrt{1 - \frac{8}{3}\mu_{ser}}\right)$$

Remarque 1

En posant : $\gamma = \dfrac{M_{Ed}}{M_{ser}}$, il vient :

$$\mu_{ser} = \frac{\frac{M_{Ed}}{\gamma}}{b_w.d^2.\overline{\sigma_c}} = \frac{1}{k_1.\gamma}.\frac{M_{Ed}}{b_w.d^2.f_{ck}} = \frac{\eta.\alpha_{cc}}{k_1.\gamma}.\frac{M_{Ed}}{b_w.d^2.\gamma_c.f_{cu}} \quad \Rightarrow$$

$$\boxed{\mu_{ser} = \frac{\eta.\alpha_{cc}}{k_1.\gamma_c.\gamma}\mu_{cu}}$$

Remarque 2

$$\mu_{ser} = \frac{1}{2}\alpha_1\left(1 - \frac{\alpha_1}{3}\right) = \psi_1.\alpha_1\left(1 - \delta_{G1}.\alpha_1\right) \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} \psi_1 = \dfrac{1}{2} \\ \delta_{G1} = \dfrac{1}{3} \end{cases}$$

Méthode de calcul :

$$\mu_{ser} = \frac{M_{ser}}{b_w.d^2.\overline{\sigma_c}} \qquad [7.19]$$

$$\Rightarrow \quad \alpha_1 = 1{,}5\left(1 - \sqrt{1 - \frac{8}{3}\mu_{ser}}\right) \qquad [7.20]$$

$$\Rightarrow \quad \sigma_{s1} = \alpha_e.\overline{\sigma_c}\,\frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1}$$

$$\Rightarrow \quad z_{c1} = d\left(1 - \frac{\alpha_1}{3}\right) \qquad [7.21]$$

$$\Rightarrow \quad A_{s1,\ ser} = \frac{M_{ser}}{z_{c1}.\sigma_{s1}} \qquad [7.22]$$

Mais, en pratique, la considération du « moment limite ultime » rend inutile le calcul de $A_{s1,\ ser}$, comme on peut le voir ci-après.

2.3 Notion de moment limite

2.3.1 Cas où la contrainte de compression du béton est limitée

En principe, il faudrait retenir :

$$A_{s1} = \text{Max}\begin{cases} A_{s1,\ u} \\ A_{s1,\ ser} \end{cases}$$

Mais, en pratique, les calculs montrent que l'on a $A_{s1,\ u} > A_{s1,\ ser}$ tant que le moment agissant ultime reste inférieur à une certaine limite M_{lu}, obtenue pour $A_{s1,\ u} = A_{s1,\ ser}$ et qui dépend de :

f_{ck} ,

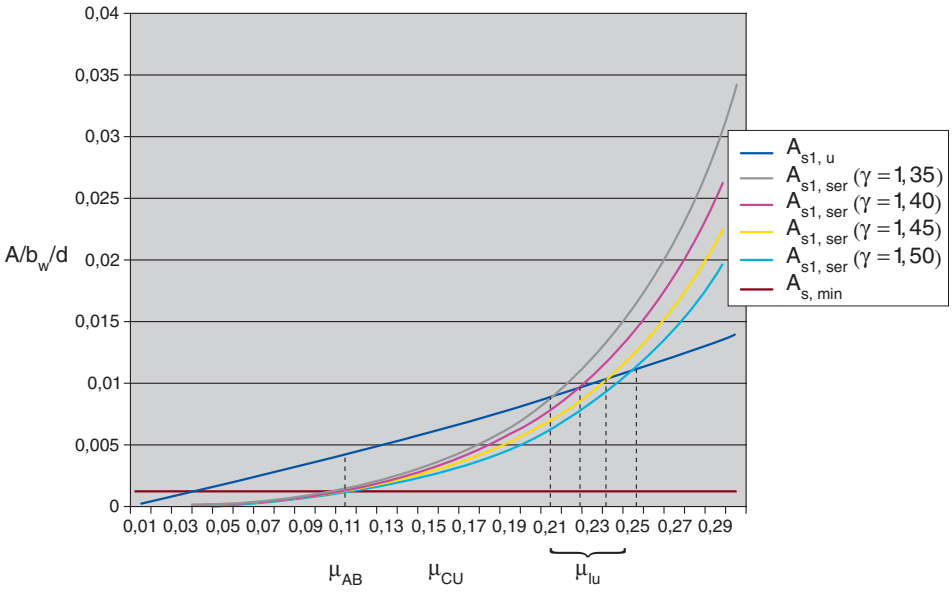
f_{yk} ,

la classe de ductilité de l'acier (dans le cas du diagramme σ–ε à palier incliné),

$$\gamma = \frac{M_{Ed}}{M_{ser}} ,$$

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{c,\ eff}} .$$

La figure ci-dessous donne une représentation graphique des résultats des calculs (cas d'un béton C25/30 et d'aciers S500 A avec $\alpha_e = 15$)



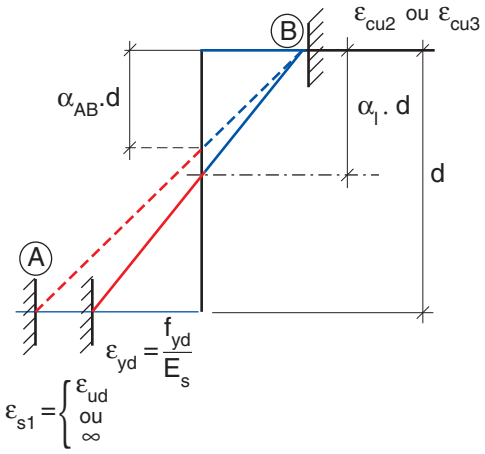
La valeur numérique de μ_{lu} est elle-même bornée à la valeur μ_{ls} pour laquelle l'allongement de l'acier tendu atteint (dans le cas des diagrammes bilinéaires de l'acier visés par les Règles EC 2) $\varepsilon_{yd} = f_{yd}/E_s$, car pour $\varepsilon_{s1} < \varepsilon_{yd}$, on aurait $\sigma_{s1} < f_{yd}$ et l'acier tendu serait mal utilisé à l'ELU.

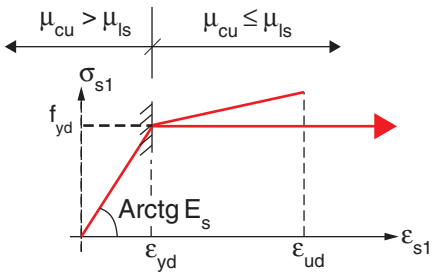
Pour obtenir cette borne, il suffit de calculer :

$$\mu_{ls} = \lambda.\alpha_l\left(1 - \frac{\lambda}{2}\,\alpha_l\right)$$

avec :

$$\alpha_l = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_{yd}} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \dfrac{f_{yd}}{E_S}}$$





ce qui conduit aux valeurs suivantes :

	Classe de résistance du béton	≤ C50/60	C55/67	C60/75	C70/85	C80/95	C90/105
Aciers	$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu2} = \varepsilon_{cu3}$ (‰)	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,6
	$\lambda = 0{,}8$ ou $0{,}8 - \frac{f_{ck} - 50}{400}$	0,8	0,7875	0,7750	0,7500	0,7250	0,7000
S 400	$\alpha_l = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \frac{f_{yd}}{E_s}}$	0,6680	0,6406	0,6251	0,6082	0,5992	0,5992
	$\mu_{ls} = \lambda.\alpha_l\left(1 - \frac{\lambda}{2}\alpha_l\right)$	0,3916	0,3772	0,3671	0,3521	0,3401	0,3315
S 500	$\alpha_l = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \frac{f_{yd}}{E_s}}$	0,6169	0,5878	0,5716	0,5540	0,5446	0,5446
	$\mu_{ls} = \lambda.\alpha_l\left(1 - \frac{\lambda}{2}\alpha_l\right)$	0,3717	0,3558	0,3449	0,3292	0,3169	0,3086

Ainsi, on est assuré que :

- la contrainte limite de compression du béton en service $\left(\overline{\sigma_c} = k_1.f_{ck}\right)$ n'est pas atteinte ;
- les aciers tendus sont utilisés au maximum de leur capacité $\left(\sigma_{s1} \geq f_{yd}\right)$.

La valeur numérique du moment réduit limite $\mu_{lu} = \frac{M_{lu}}{b_w.d^2.f_{cu}}$ ne résulte pas d'un calcul simple. Il existe des tables donnant les valeurs précises de μ_{lu} (voir annexe A2). On dispose également de formules approchées (voir § 3.3.2)[7].

7. [annexe A2]

L'examen des tableaux donnant les valeurs précises des moments limites ultimes réduits, montre que, tous les autres paramètres étant égaux par ailleurs :

- si l'on fait varier la classe d'aciers, on a toujours $\mu_{lu}(A) \leq \mu_{lu}(C) < \mu_{lu}(B)$, avec des écarts relatifs maximaux par rapport aux aciers de classe A de 0,15 % et 0,61 % respectivement ;
- si l'on fait varier le coefficient d'équivalence α_e, les courbes $\mu_{lu}(\alpha_e)$ sont paraboliques et sensiblement parallèles.

On peut donc se contenter de ne considérer que la valeur de μ_{lu} correspondant aux aciers de classe A ou aux aciers avec diagramme à palier horizontal et à $\alpha_e = 15$ (valeur conventionnelle adoptée par les Règles françaises BAEL 91) en prenant pour $f_{ck} \leq 50$ MPa :

$$\begin{cases} \mu_{lu}(\alpha_e) = \mu_{lu}(15).K \\ \text{où :} \\ \quad K = \left(A + B.\alpha_e + C.\alpha_e^2\right).10^{-4} \\ \quad \text{avec :} \\ \quad\quad \bullet \text{ pour les diagrammes à palier incliné : } \begin{cases} A = 75{,}3.f_{ck} - 189{,}8 \\ B = -5{,}6.f_{ck} + 874{,}5 \\ C = 0{,}04.f_{ck} - 13 \end{cases} \\ \quad\quad \bullet \text{ pour le diagramme à palier horizontal : } \begin{cases} A = 71{,}2.f_{ck} + 108 \\ B = -5{,}2.f_{ck} + 847{,}4 \\ C = 0{,}03.f_{ck} - 12{,}5 \end{cases} \end{cases}$$

La valeur de $\mu_{lu}(15)$ étant tirée des tableaux ci-dessous :

Tableau des moments réduits $10^4.\mu_{lu}$ (15)
Diagramme σ–ε à palier incliné

$\overline{\sigma_c} = 0{,}6.f_{ck}$	Béton →		C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50
Aciers ↓	γ ↓	α_e ↓							
S 500	1,35	15	1 363	1 651	1 886	2 125	2 319	2 479	2 613
	1,40	15	1 454	1 757	2 003	2 252	2 453	2 618	2 756
	1,45	15	1 549	1 866	2 123	2 382	2 590	2 760	2 901
	1,50	15	1 645	1 977	2 245	2 513	2 728	2 903	3 049

$\overline{\sigma_c} = 0,6.f_{ck}$	Béton →		C45/55	C50/60	C55/67	C60/75	C70/85	C80/95	C90/105
Aciers ↓	γ ↓	α_e ↓							
S 500	1,35	15	2 726	2 824	2 994	3 163	4 077		
	1,40	15	2 873	2 972	3 149	3 325	4 622		
	1,45	15	3 021	3 123	3 307	3 706			
	1,50	15	3 171	3 275	3 466	4 673			

Les cases grisées du tableau ci-dessus (avec ou sans indication de valeur) correspondent aux cas où $\mu_{lu} > \mu_{ls}$. Pour ces cas, il convient donc de prendre $\boxed{\mu_{lu} = \mu_{ls}}$

Tableau des moments réduits $10^4.\mu_{lu}$ (15)
Diagramme σ–ε à palier horizontal

$\overline{\sigma_c} = 0,6.f_{ck}$	Béton →		C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50
Aciers ↓	γ ↓	α_e ↓							
S 500	1,35	15	1 390	1 672	1 903	2 139	2 330	2 488	2 620
	1,40	15	1 480	1 777	2 019	2 265	2 463	2 626	2 762
	1,45	15	1 573	1 885	2 138	2 393	2 598	2 766	2 906
	1,50	15	1 668	1 994	2 258	2 523	2 735	2 909	3 053

$\overline{\sigma_c} = 0,6.f_{ck}$	Béton →		C45/55	C50/60	C55/67	C60/75	C70/85	C80/95	C90/105
Aciers ↓	γ ↓	α_e ↓							
S 500	1,35	15	2 732	2 829	2 997	3 164	4 077		
	1,40	15	2 878	2 977	3 151	3 325	4 622		
	1,45	15	3 025	3 126	3 308	3 706			
	1,50	15	3 174	3 277	3 466	4 673			

Les cases grisées du tableau ci-dessus (avec ou sans indication de valeur) correspondent aux cas où $\mu_{lu} > \mu_{ls}$. Pour ces cas, il convient donc de prendre $\boxed{\mu_{lu} = \mu_{ls}}$

2.3.2 Cas où la contrainte de compression du béton n'est pas limitée

Pour utiliser au mieux les aciers tendus à l'ELU, on limite la valeur du moment réduit μ_{cu} à la valeur μ_{ls} pour laquelle l'allongement de l'acier tendu atteint (dans le cas des diagrammes bilinéaires de l'acier visés par les Règles EC 2) $\varepsilon_{yd} = f_{yd}/E_s$, car pour $\varepsilon_{s1} < \varepsilon_{yd}$, on aurait $\sigma_{s1} < f_{yd}$ et l'acier tendu serait mal utilisé à l'ELU.

On pose :

$\boxed{\mu_{lu} = \mu_{ls}}$: moment réduit limite ultime

Tableau des moments réduits $10^4.\mu_{lu}$
Diagramme σ–ε à palier horizontal ou incliné

$\overline{\sigma_c}$ non limité	Béton →		C12/15 à C50/60	C55/67	C60/75	C70/85	C80/95	C90/105
Aciers ↓	γ ↓	α_e ↓						
S 400	1,35 à 1,50	6 à 27	3 916	3 772	3 671	3 521	3 401	3 315
S 500	1,35 à 1,50	6 à 27	3 717	3 558	3 449	3 292	3 169	3 086

2.4 Conclusion

Si $\mu_{cu} \leq \mu_{lu}$, on a $A_{s1} = A_{s1,\,u}$ calculé à l'état limite ultime comme indiqué aux § 2.1.5 ou 2.1.6 avec :

- pour le diagramme de calcul σ–ε à palier horizontal : $\sigma_{s1} = f_{yd}$ (le calcul de ε_{s1} étant alors inutile) ;
- pour le diagramme de calcul σ–ε à palier incliné : σ_{s1} donné par les formules du § 2.4.2.1 du chapitre 3 : « Béton armé – Généralités ».

Si $\mu_{cu} > \mu_{lu}$, il faut :

- ou changer les dimensions de la section ;
- ou bien augmenter la résistance du béton lorsque cela est possible ;
- ou enfin prévoir des aciers comprimés calculés suivant les indications du § 3 ci-après.

On peut retenir en première approximation, pour $f_{ck} = 25$ MPa et des aciers S 500 :

$\mu_{lu} = 0,225.K$: diagramme σ – ε à palier incliné ou horizontal si σ_c limitée
$\mu_{lu} = \mu_{ls} = 0,3717$: diagramme σ – ε à palier incliné ou horizontal si σ_c non limitée

[7.23]

la valeur du coefficient K, qui traduit l'influence du coefficient d'équivalence α_e, étant celle donnée au § 2.3.1

et, d'autre part :

$$\forall\ \gamma = \frac{M_{Ed}}{M_{ser}} : \mu_{lu} > \mu_{AB} \text{ donné au § 2.1.3.} \qquad [7.24]$$

Remarque

Dans le cas des ponts,

Si $\alpha_{cc} = 0,85$ (voir § 2.4.2.2, chapitre 3 : « Béton armé – Généralités »). Les tableaux donnant μ_{lu} ayant été établis à partir de $\alpha_{cc} = 1.0$, il convient alors, pour déterminer la valeur du moment limite ultime réduit :

– lorsque $\overline{\sigma_c} = 0{,}6.f_{ck}$, de considérer un béton fictif de résistance caractéristique égale à $\alpha_{cc}.f_{ck}$ (pour des bétons de classe supérieure à C55/65, on obtient une approximation sur μ_{lu} compte tenu de la variation des coefficients λ et η) ;
– lorsque $\overline{\sigma_c}$ n'est pas limité, de conserver la résistance caractéristique du béton envisagé (puisque $\mu_{lu} = \mu_{ls}$) ;
– la méthode de calcul étant ensuite inchangée.

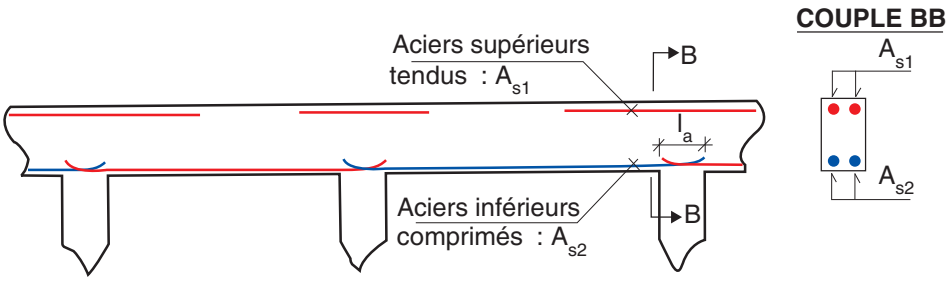
3. Section rectangulaire avec aciers comprimés

3.1 Cas où la contrainte de compression du béton est limitée

3.1.1 Préambule

Des aciers comprimés ne sont strictement requis que, lorsqu'à l'ELU, $M_{Ed} > M_{lu}$ (ou à l'ELS $M_{ser} > M_{lser} = \dfrac{M_{lu}}{\gamma}$ avec $\gamma = \dfrac{M_{Ed}}{M_{ser}}$).

Mais il peut exister, dans la zone comprimée sous l'effet du moment agissant, des aciers capables de jouer le rôle d'aciers comprimés : par exemple, sur un appui de poutre continue, les aciers inférieurs équilibrant des moments positifs en travée, mais prolongés jusqu'aux appuis (voir § 9 du chapitre 8 : « Effort – Tranchant »).



Il faut, dans ce cas, prendre en compte le fait que, si la profondeur d'ancrage disponible pour ces aciers, l_a, est inférieure à leur longueur d'ancrage, soit l_{bd} pour des ancrages droits ou $l_{b,\,eq}$ pour des ancrages courbes, la section à introduire dans les calculs doit être réduite dans le rapport l_a/l_{bd} ou $l_a/l_{b,\,eq}$ (voir § 3.8 et 4.1, chapitre 4 : « Dispositions constructives »).

3.1.2 Hypothèses

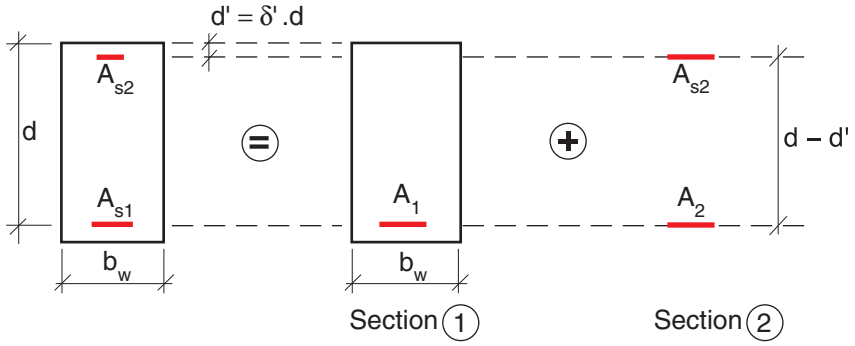
On considère la section comme résultant de la superposition de deux sections fictives ① et ② :

1/ une section rectangulaire ① :

- de mêmes dimensions que la section réelle ;
- sans aciers comprimés ;
- dont l'armature tendue est constituée par une fraction A_1 de la section totale A_{s1} ;
- qui équilibre une fraction M_1 du moment total (M_{Ed} ou M_{ser} selon l'état limite considéré) ;

2/ une section sans béton ② :

- de hauteur d – d' ;
- de largeur nulle ;
- dont la membrure comprimée est constituée par la section A_{s2} d'aciers comprimés ;
- dont l'armature tendue est constituée par la fraction $A_2 = A_{s1} - A_1$ de la section totale A_{s1} ;
- qui équilibre une fraction $M_2 = M - M_1$ du moment total M.



$$M_{Ed} = M_{Ed1} + \begin{cases} A'.\sigma_{scu}\,(d-d') \\ \text{ou} \\ A_2.\sigma_{su}\,(d-d') \end{cases}$$

Dans ce cas, il faut trouver à la fois A_{s1} et A_{s2}.

Il existe théoriquement une infinité de solutions, c'est-à-dire un nombre infini de couples A_{s1} et A_{s2} permettant d'équilibrer le moment appliqué (A_{s2}= 4e inconnue pour les trois équations du § 1.2.3).

Toutefois, un certain nombre de ces solutions ne peuvent être retenues :

- soit parce qu'elles ne sont pas économiques ;
- soit parce qu'elles ne permettent pas de satisfaire la condition $\sigma_c \leq \overline{\sigma_c}$ en service.

Dans ce qui suit, nous adopterons une méthode simplifiée consistant à se fixer a priori le moment que l'on veut faire équilibrer par la section rectangulaire sans aciers comprimés de la décomposition en deux sections fictives.

3.1.3 Remarques préliminaires importantes

1/ Lorsqu'à l'ELU, $M_{Ed} = M_{lu}$ (et donc, à l'ELS $M_{ser} = M_{lser} = \frac{M_{lu}}{\gamma}$), la section A_1 d'acier tendu nécessaire à l'équilibre de la section ① peut, indifféremment, être calculée par l'une ou l'autre des deux formules :

$$\text{ou} \begin{cases} A_1 = \dfrac{M_{lu}}{z_c.\sigma_{s1}} & [7.25] \\ A_1 = \dfrac{M_{lser}}{z_{c1}.\sigma_{s1,\ ser}} & [7.26] \end{cases}$$

avec :

$$z_c = d\left[1 - \frac{\lambda}{2}\alpha_1\right] \text{ et } \alpha_1 = \frac{1}{\lambda}\left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{lu}}\right]$$

$$z_{c1} = d\left[1 - \frac{\alpha_{11}}{3}\right] \text{ et } \sigma_{s1,\ ser} = \alpha_e.\overline{\sigma_c}\,\frac{1 - \alpha_{11}}{\alpha_{11}}$$

α_{11} pouvant être lui-même obtenu par résolution de l'équation du second degré :

$$\frac{\alpha_{11}}{2}\left(1 - \frac{\alpha_{11}}{3}\right) = \frac{M_{lser}}{b_w.d^2.\overline{\sigma_c}} = \frac{\mu_{lu}}{\gamma}.\frac{f_{cu}}{\overline{\sigma_c}}$$

En identifiant [7.25] et [7.26], on voit immédiatement que :

$$\gamma.\sigma_{s1,\ ser} = \sigma_{s1}\frac{z_c}{z_{c1}}\ . \qquad [7.27]$$

2/ Lorsqu'à l'ELU $M_{Ed} > M_{lu}$ (et donc, à l'ELS $M_{ser} > M_{lser} = \frac{M_{lu}}{\gamma}$) et que la section d'aciers comprimés n'est pas imposée, la section rectangulaire ①, sans aciers comprimés, ne peut équilibrer au plus que M_{lu} (ou, ce qui revient au même, au plus que M_{lser}) et la section A_1 d'aciers tendus nécessaire à son équilibre est donnée soit par la relation [7.25], soit par la relation [7.26].

La section d'aciers comprimés est alors déterminée pour équilibrer l'excédent de moment et donc soit $M_{Ed} - M_{lu}$, soit $M_{ser} - M_{lser}$.

Comme pour la section ① la situation est « figée », puisque :

- à l'ELU, α_l constant et $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu2}$ ou ε_{cu3} suivant le diagramme σ–ε du béton utilisé (= 3,5/1 000 pour $f_{ck} \leq 50$ MPa) conduisent à un diagramme de déformations invariable,
- à l'ELS, α_{ll} constant et la contrainte maximale du béton plafonnée à $\overline{\sigma_c} = k_1.f_{ck}$ conduisent à un diagramme des contraintes invariable,

dans un cas comme dans l'autre, la contrainte des aciers comprimés est invariable, et la section A_{s2} nécessaire pour ces aciers est donc proportionnelle à $M_{Ed} - M_{lu}$ (ou, ce qui est équivalent, à $M_{ser} - M_{lser}$). Il en est de même pour la section d'aciers tendus qui lui fait équilibre dans la section fictive ②.

3/ Les développements ci-après sont conduits avec le diagramme parabole-rectangle, c'est-à-dire pour un raccourcissement maximal du béton limité à $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu2}$. Si l'on désire utiliser un autre diagramme contrainte-déformations simplifié, il suffit de remplacer ε_{cu2} par ε_{cu3} dans les formules qui suivent.

3.1.4 Calcul des aciers comprimés dans le cas où ceux-ci ne sont pas imposés

On ignore a priori si la section cherchée résulte d'un calcul à l'ELU ou d'un calcul à l'ELS.

a) Dimensionnement à l'ELU

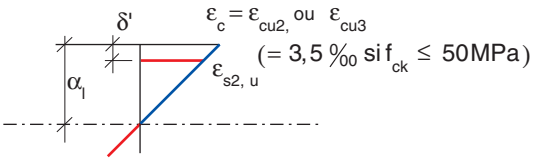
Compte tenu de la remarque 2 ci-devant, la section $A_{s2,\,u}$ nécessaire doit être telle que :

$$A_{s2,\,u}.\sigma_{s2,\,u}\,(d - d') = M_{Ed} - M_{lu} \qquad [7.28]$$

avec $\sigma_{s2,\,u}$ contrainte des aciers comprimés à l'ELU, déterminée par le diagramme de calcul des aciers, à partir de leur raccourcissement $\varepsilon_{s2,\,u}$:

$$\varepsilon_{s2,\,u} = \varepsilon_{cu2}\,\frac{\alpha_l - \delta'}{\alpha_l}$$

où $\delta' = \dfrac{d'}{d}$



Pour α_l, voir remarque 1 au § 3.1.3.

Quels que soient f_{yk}, f_{ck}, γ et $\alpha_e \geq 15$, on a toujours $\sigma_{s2,\,u} \geq f_{yd}$ ($\sigma_{s2,\,u} = f_{yd}$ pour le diagramme σ–ε à palier horizontal) lorsque $\delta' \leq 0{,}10$, ce qui est généralement le cas.

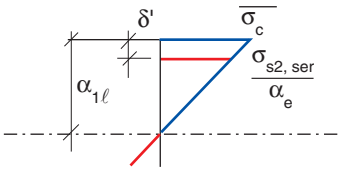
b) Dimensionnement à l'ELS

Compte tenu de la remarque 2 au § 3.1.3, la section $A_{s2,\,ser}$ nécessaire doit être telle que :

$$A_{s2,\ ser}.\sigma_{s2,\ ser}\,(d - d') = M_{ser} - M_{lser} \qquad [7.29]$$

avec $\sigma_{s2,\ ser}$ contrainte des aciers comprimés à l'ELS, déterminée par le diagramme « figé » des contraintes :

$$\sigma_{s2,\ ser} = \alpha_e.\overline{\sigma_c}\,\frac{\alpha_{1l} - \delta'}{\alpha_{1l}}\ .$$



Pour α_{1l}, voir remarque 1 au § 3.1.3.

c) Conclusion

Finalement, la section d'aciers comprimés à retenir est :

$$A_{s2} = \text{Max}\begin{cases} A_{s2,\ u} \\ A_{s2,\ ser} \end{cases} = \text{Max}\begin{cases} \dfrac{M_{Ed} - M_{lu}}{(d - d')\sigma_{s2,\ u}} \\ \dfrac{M_{ser} - M_{lser}}{(d - d')\sigma_{s2,\ ser}} \end{cases}$$

En multipliant haut et bas le second terme de la dernière expression par le coefficient γ et en posant $\sigma_{s2,\ e} = \text{Min}\begin{cases} \sigma_{s2,\ u} \\ \gamma.\sigma_{s2,\ ser} \end{cases}$, on évite le double calcul de $A_{s2,\ u}$ et $A_{s2,\ ser}$, et il ne subsiste plus qu'une valeur unique :

$$A_{s2} = \frac{M_{Ed} - M_{lu}}{(d - d')\sigma_{s2,\ e}} \qquad [7.30]$$

que l'on peut retenir comme valeur strictement requise.

La valeur approchée donnée au § 3.3.3 pour $\sigma_{s2,\ e}$ évite tout calcul fastidieux de α_{1l} puis de $\gamma.\sigma_{s2,\ ser}$.

3.1.5 Calcul des aciers tendus

a) Cas où la section A_{s2} des aciers comprimés n'est pas imposée

La section A_{s2} strictement nécessaire est déterminée par la relation [7.30].

L'équilibre des forces de la section ② exige de prévoir une section d'aciers tendus A_2 telle que :

à l'ELU : $A_2.\sigma_{s1} = A_{s2,\ u}.\sigma_{s2,\ u}$

à l'ELS : $A_2.\sigma_{s1,\ ser} = A_{s2,\ ser}.\sigma_{s2,\ ser}$ avec : $\sigma_{s1,\ ser} = \alpha_e.\overline{\sigma_c}\,\dfrac{1-\alpha_{1l}}{\alpha_{1l}}$ (pour α_{1l}, voir remarque 1 au § 3.1.3).

La section d'aciers tendus à retenir, $A_{s1} = A_1 + A_2$, est donc égale à la plus grande des deux sections $A_{s1,\ u}$ et $A_{s1,\ ser}$ déduites des équations d'équilibre des forces :

$$A_{s1,\ u}.\sigma_{s1} = \frac{M_{lu}}{z_c} + A_{s2,\ u}.\sigma_{s2,\ u}$$

$$A_{s1,\ ser}.\sigma_{s1,\ ser} = \frac{M_{lser}}{z_{c1}} + A_{s2,\ ser}.\sigma_{s2,\ ser}$$

soit respectivement :

$$A_{s1,\ u} = \frac{M_{lu}}{z_c.\sigma_{s1}} + A_{s2,\ u}\,\frac{\sigma_{s2,\ u}}{\sigma_{s1}}$$

$$A_{s1,\ ser} = \frac{M_{lser}}{z_{c1}.\sigma_{s1,\ ser}} + A_{s2,\ ser}\,\frac{\sigma_{s2,\ ser}}{\sigma_{s1,\ ser}}$$

Compte tenu de [7.25] et [7.26], les deux premiers termes des deux relations donnant $A_{s1,\ u}$ et $A_{s1,\ ser}$ étant identiques :

$$A_{s1,\ u} = \frac{M_{lu}}{z_c.\sigma_{s1}} + A_{s2,\ u}\,\frac{\sigma_{s2,\ u}}{\sigma_{s1}}$$

$$A_{s1,\ ser} = \frac{M_{lu}}{z_c.\sigma_{s1}} + A_{s2,\ ser}\,\frac{\sigma_{s2,\ ser}}{\sigma_{s1,\ ser}} = \frac{M_{lu}}{z_c.\sigma_{s1}} + A_{s2,\ ser}\,\frac{\gamma.\sigma_{s2,\ ser}}{\gamma.\sigma_{s1,\ ser}}$$

Compte tenu de [7.28] et [7.29], les deux derniers termes des deux relations donnant $A_{s2,\ u}$ et $A_{s2,\ ser}$ permettent d'écrire :

$$A_{s1,\ u} = \frac{M_{lu}}{z_c.\sigma_{s1}} + \frac{M_{Ed} - M_{lu}}{(d-d')\sigma_{s2,\ u}}.\frac{\sigma_{s2,\ u}}{\sigma_{s1}} = \frac{M_{lu}}{z_c.\sigma_{s1}} + \frac{M_{Ed} - M_{lu}}{(d-d')\sigma_{s1}}$$

$$A_{s1,\ ser} = \frac{M_{lu}}{z_c.\sigma_{s1}} + \frac{M_{ser} - M_{lser}}{(d-d')\sigma_{s2,\ ser}}.\frac{\gamma.\sigma_{s2,\ ser}}{\gamma.\sigma_{s1,\ ser}} = \frac{M_{lu}}{z_c.\sigma_{s1}} + \frac{M_{Ed} - M_{lu}}{(d-d')\gamma.\sigma_{s1,\ ser}}$$

D'où, en posant :

$$\sigma_{s1,\ e} = \text{Min}\begin{cases}\sigma_{s1}\\ \gamma.\sigma_{s1,\ ser}\end{cases} \text{ et } \sigma_{s2,\ e} = \text{Min}\begin{cases}\sigma_{s2,\ u}\\ \gamma.\sigma_{s2,\ ser}\end{cases},$$

on aboutit à la valeur unique :

$$\boxed{A_{s1} = \frac{M_{lu}}{z_c.\sigma_{s1}} + A_{s2}\frac{\sigma_{s2,\,e}}{\sigma_{s1,\,e}}} \qquad [7.31]$$

La valeur approchée donnée au § 3.3.4 pour $\sigma_{s1,\,e}$ évite d'avoir à calculer $\gamma.\sigma_{s1,\,ser}$.

Remarques

1/ L'anomalie consistant à avoir des contraintes différentes (σ_{s1} et $\sigma_{s1,\,e}$) aux dénominateurs des deux termes donnant A_{s1} n'est qu'apparente : l'expression [7.31] a bien été obtenue à partir des équations d'équilibre des forces,

2/ Compte tenu de la relation [7.27] ci-devant, on peut écrire :

$$\sigma_{s1,\,e} = \sigma_{s1}.\text{Min}\left\{1 ; \frac{z_c}{z_{c1}}\right.$$

3/ Pour des aciers S 500, le rapport $\frac{z_c}{z_{c1}}$ peut varier, selon les valeurs de γ et de f_{ck} (entre 25 et 50 MPa) de 1,01 à 0,96. Il en résulte que l'on commet une approximation en général par léger défaut sur le terme $A_{s2}\frac{\sigma_{s2,\,e}}{\sigma_{s1,\,e}}$ en prenant dans tous les cas $\sigma_{s1,\,e} = \sigma_{s1}$, mais que la valeur $\boxed{A_{s1} = \frac{M_{lu}}{z_c.\sigma_{s1}} + A_{s2}\frac{\sigma_{s2,\,e}}{\sigma_{s1}}}$ peut néanmoins être retenue pour une estimation rapide de la section d'aciers tendus.

b) Cas où la section des aciers comprimés est imposée

Soit $A_{s2,\,réel}$ cette section.

La section A_{s2} à introduire dans les calculs n'est pas nécessairement égale à $A_{s2,\,réel}$. Il faut en effet s'assurer tout d'abord que la longueur d'ancrage l_a des aciers comprimés, de part et d'autre de la section droite où agit le moment M_{Ed}, est au moins égale à l_{bd} pour des ancrages droits ou à $l_{b,\,eq}$ pour des ancrages courbes, c'est-à-dire prendre :

$$A_{s2} = \text{Min}\left\{\begin{array}{l} A_{s2,\,réel} \\ A_{s2,\,réel}\,\frac{l_a}{l_{bd}} : \text{ancrages droits,} \\ A_{s2,\,réel}\,\frac{l_a}{l_{b,\,eq}} : \text{ancrages courbes,} \end{array}\right.$$

avec la condition supplémentaire :

$A_{s2} \geq \dfrac{M_{Ed} - M_{lu}}{(d - d')\sigma_{s2,\,e}}$ avec $\sigma_{s2,\,e} = \text{Min}\begin{cases}\sigma_{s2,\,u} \\ \gamma.\sigma_{s2,\,ser}\end{cases}$ ou formules approchées du § 3.3.3,

sinon, on se trouve ramené au cas a) où la section des aciers comprimés n'est pas imposée.

On procède alors de la façon suivante :

on calcule : $M_{Ed1} = M_{Ed} - A_{s2}.\sigma_{s2,\,e}(d - d')$;

la section d'aciers tendus A_1 qui doit équilibrer M_{Ed1} est déterminée en calculant :

$$\mu_{cu} = \frac{M_{Ed1}}{b_w.d^2.f_{cu}}$$

puis $\begin{cases} z_c = d\left[1 - 0,6.\mu_{cu}\right] \text{ si } \mu_{cu} \leq 0,225 \text{ (cf. § 3.3.1)} \\ z_c = d\left[1 - \dfrac{\lambda}{2}\alpha_u\right] \text{ avec } \alpha_u = \dfrac{1}{\lambda}\left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{cu}}\right] \text{ sinon} \end{cases}$

et enfin : $\boxed{A_{s1} = \dfrac{M_{Ed1}}{z_c.\sigma_{s1}} + A_{s2}\dfrac{\sigma_{s2,\,e}}{\sigma_{s1,\,e}}}$

c) Cas des sections à armatures symétriques

Se reporter à l'annexe 4 disponible en ligne sur www.editions-eyrolles sur la fiche de l'ouvrage et aux diagrammes d'interaction du § 5 au chapitre 11 : « Flexion composée ».

3.2 Cas où la contrainte de compression du béton n'est pas limitée

La méthode exposée au § 3.1 est transposable moyennant les adaptations ci-dessous (à partir de la décomposition en deux sections fictives).

3.2.1 Calcul des aciers comprimés dans le cas où ceux-ci ne sont pas imposés

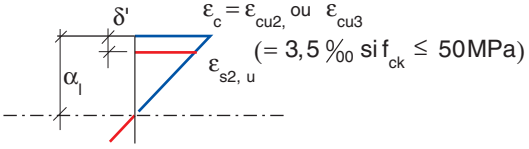
La section $A_{s2,\,u}$ nécessaire doit être telle que :

$$A_{s2,\,u}.\sigma_{s2,\,u}(d - d') = M_{Ed} - M_{lu} \quad \Rightarrow \quad \boxed{A_{s2,\,u} = \frac{M_{Ed} - M_{lu}}{(d - d')\sigma_{s2,\,u}}} \qquad [7.32]$$

avec $\sigma_{s2,\,u}$ contrainte des aciers comprimés à l'ELU, déterminée par le diagramme de calcul des aciers, à partir de leur raccourcissement $\varepsilon_{s2,\,u}$:

$$\alpha_1 = \frac{1}{\lambda}\left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{lu}}\right]$$

$$\varepsilon_{s2,\,u} = \varepsilon_{cu2}\,\frac{\alpha_1 - \delta'}{\alpha_1}$$



où $\delta' = \dfrac{d'}{d}$

Quels que soient f_{yk}, $f_{ck} \leq 70$ MPa, γ et α_e, on a toujours $\sigma_{s2,\,u} \geq f_{yd}$ ($\sigma_{s2,\,u} = f_{yd}$ pour le diagramme σ–ε à palier horizontal) lorsque $\delta' \leq 0{,}10$, ce qui est généralement le cas.

3.2.2 Calcul des aciers tendus

a) Cas où la section A_{s2} des aciers comprimés n'est pas imposée

La section A_{s2} strictement nécessaire est déterminée par la relation [7.32].

L'équilibre des forces de la section ② exige de prévoir une section d'aciers tendus A_2 telle que :

$$A_2.\sigma_{s1} = A_{s2,\,u}.\sigma_{s2,\,u}$$

La section d'aciers tendus à retenir, $A_{s1} = A_1 + A_2$, est donc égale à la section $A_{s1,\,u}$ déduite de l'équation d'équilibre des forces :

$$A_{s1,\,u}.\sigma_{s1} = \frac{M_{lu}}{z_c} + A_{s2,\,u}.\sigma_{s2,\,u}$$

soit :

$$A_{s1,\,u} = \frac{M_{lu}}{z_c.\sigma_{s1}} + A_{s2,\,u}\,\frac{\sigma_{s2,\,u}}{\sigma_{s1}}$$

avec $\sigma_{s1} = f_{yd}$ puisque $M_{lu} = M_{ls}$ lorsque la contrainte de compression du béton n'est pas limitée.

Compte tenu de [7.32], le dernier terme de la relation donnant $A_{s1,\,u}$ permet d'écrire :

$$A_{s1,\,u} = \frac{M_{lu}}{z_c.\sigma_{s1}} + \frac{M_{Ed} - M_{lu}}{(d - d')\sigma_{s2,\,u}}.\frac{\sigma_{s2,\,u}}{\sigma_{s1}} \quad \text{avec} \quad \sigma_{s1} = f_{yd}$$

$$\boxed{A_{s1,\,u} = \frac{M_{lu}}{z_c.f_{yd}} + \frac{M_{Ed} - M_{lu}}{(d - d')f_{yd}}} \qquad [7.33]$$

b) Cas où la section des aciers comprimés est imposée

Soit $A_{s2,\ réel}$ cette section.

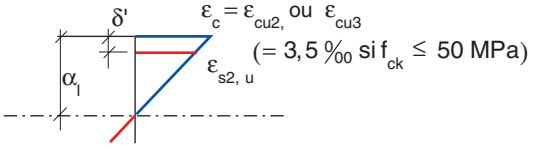
$$A_{s2} = \text{Min}\begin{cases} A_{s2,\ réel} \\ A_{s2,\ réel}\ \dfrac{l_a}{l_{bd}} : \text{ancrages droits,} \\ A_{s2,\ réel}\ \dfrac{l_a}{l_{b,\ eq}} : \text{ancrages courbes,} \end{cases}$$

$$A_{s2} \geq \frac{M_{Ed} - M_{lu}}{(d - d')\sigma_{s2,\ u}} = \frac{M_{Ed} - M_{ls}}{(d - d')\sigma_{s2,\ u}}$$

où $\sigma_{s2,\ u}$ est la contrainte des aciers comprimés à l'ELU, déterminée par le diagramme de calcul des aciers, à partir de leur raccourcissement $\varepsilon_{s2,\ u}$:

$$\alpha_l = \frac{1}{\lambda}\left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{lu}}\right]$$

$$\varepsilon_{s2,\ u} = \varepsilon_{cu2}\ \frac{\alpha_l - \delta'}{\alpha_l}$$



où $\delta' = \dfrac{d'}{d}$

sinon, on se trouve ramené au cas a) où la section des aciers comprimés n'est pas imposée.

On procède alors de la façon suivante :

- on calcule : $M_{Ed1} = M_{Ed} - A_{s2}.\sigma_{s2,\ u}\,(d - d')$;
- la section d'aciers tendus A_1 qui doit équilibrer M_{Ed1} est déterminée en calculant :

$$\mu_{cu} = \frac{M_{Ed1}}{b_w.d^2.f_{cu}}$$

$$z_c = d\left[1 - \frac{\lambda}{2}\alpha_u\right] \text{ avec } \alpha_u = \frac{1}{\lambda}\left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{cu}}\right]$$

et enfin : $\boxed{A_{s1} = \dfrac{M_{Ed1}}{z_c.f_{yd}} + A_{s2}\ \dfrac{\sigma_{s2,\ u}}{f_{yd}}}$

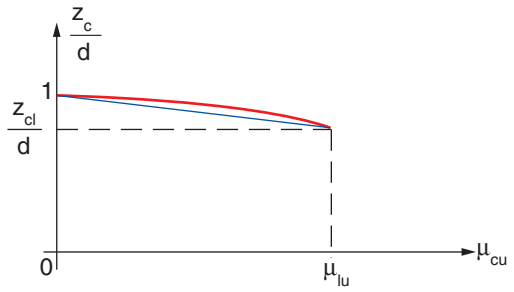
c) Cas des sections à armatures symétriques

Se reporter à l'annexe 4 disponible en ligne sur www.editions-eyrolles sur la fiche de l'ouvrage et aux diagrammes d'interaction du § 5 au chapitre 11 : « Flexion composée ».

3.3 Formules approchées pour l'ELU

3.3.1 Bras de levier z_c à l'ELU

La courbe $z_c/d = f(\mu_{cu})$ est peu concave et sa concavité est tournée vers le bas. On peut la remplacer par une corde, ce qui va dans le sens de la sécurité.



Cette corde peut être définie par deux points :

$z_c = d$ quand $\mu_{cu} = 0$,

$z_c = z_{cl}$ quand $\mu_{cu} = \mu_{lu}$.

En adoptant $\mu_{lu} \approx 0,225$, que le diagramme σ–ε soit à palier incliné ou horizontal, ce qui correspond sensiblement à $f_{yk} = 500$ MPa, $f_{ck} = 25$ MPa et $\gamma \approx 1,4$, on trouve :

$$\alpha_u = \frac{1}{\lambda}\left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{lu}}\right] = \frac{1}{0,8}\left[1 - \sqrt{1 - 2.0,225}\right] = 0,3229$$

$$z_{cl} = d\left[1 - \frac{\lambda}{2}.\alpha_u\right] = d\left[1 - \frac{0,8}{2}0,3229\right] = 0,871.d$$

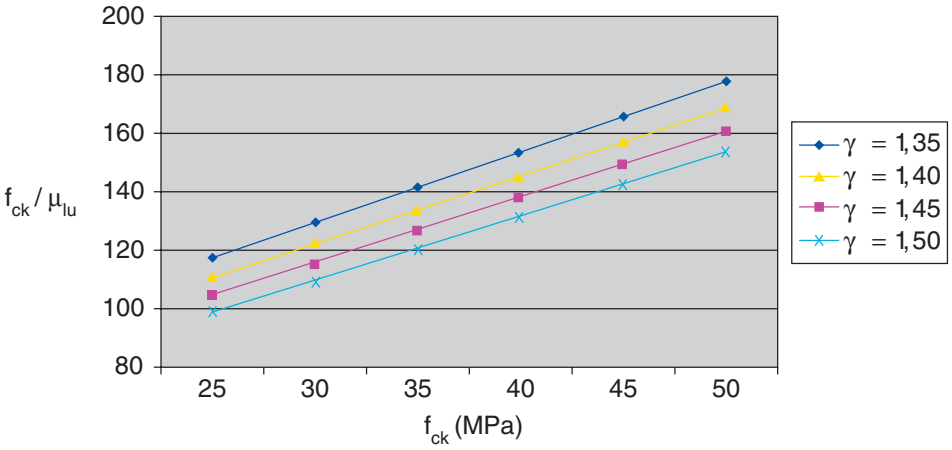
d'où l'équation de la droite cherchée :

$$\frac{z_c}{d} = 1 - 0,129\frac{\mu_{cu}}{0,225} = 1 - 0,6.\mu_{cu}$$

Par conséquent, on peut adopter comme valeur approchée par léger défaut que le diagramme σ–ε de l'acier soit à palier incliné ou horizontal :

$$\boxed{\mu_{cu} \le 0,225 \quad \Rightarrow \quad z_c = d\left[1 - 0,6.\mu_{cu}\right]} \qquad [7.34]$$

3.3.2 Moment limite μ_{lu} lorsque la contrainte de compression du béton est limitée



S 500 A : f_{ck}/μ_{lu} en fonction de f_{ck}.

En remarquant que le rapport $\frac{f_{ck}}{\mu_{lu}}$ varie de façon sensiblement linéaire en fonction de f_{ck}, on peut établir une formule approchée pour μ_{lu} qui est de la forme :

$$\frac{f_{ck}}{\mu_{lu}} = a.f_{ck} + b \quad \Rightarrow \quad \mu_{lu} = \frac{f_{ck}}{a.f_{ck} + b}$$

On obtient ainsi la formule approchée suivante, valable pour les aciers S 500 et quel que soit $f_{ck} \leq 50$ MPa :

- diagramme σ–ε à palier incliné :

$$\mu_{lu} = \frac{f_{ck}}{(4,62 - 1,66.\gamma) f_{ck} + (165,69 - 79,62.\gamma)} K \qquad [7.35]$$

- diagramme σ–ε à palier horizontal :

$$\mu_{lu} = \frac{f_{ck}}{(4,69 - 1,70.\gamma) f_{ck} + (159,90 - 76,20.\gamma)} K \qquad [7.36]$$

le coefficient correcteur K pour la prise en compte de la variation de α_e étant celui figurant au § 2.3.1 :

$$K = \left(A + B.\alpha_e + C.\alpha_e^2\right).10^{-4}$$

avec :

- pour les diagrammes à palier incliné : $\begin{cases} A = 75{,}3.f_{ck} - 189{,}8 \\ B = -5{,}6.f_{ck} + 874{,}5 \\ C = 0{,}04.f_{ck} - 13 \end{cases}$
- pour le diagramme à palier horizontal : $\begin{cases} A = 71{,}2.f_{ck} + 108 \\ B = -5{,}2.f_{ck} + 847{,}4 \\ C = 0{,}03.f_{ck} - 12{,}5 \end{cases}$

Si $f_{ck} \geq 55$ MPa, il faut utiliser les valeurs tirées des tableaux de l'annexe A2.

Remarque

Dans le cas des ponts, si α_{cc} est différent de 1, il convient de considérer, pour l'application des formules ci-dessus, un béton fictif de résistance caractéristique égale à $\alpha_{cc}.f_{ck}$ (voir remarque, § 2.4).

3.3.3 Contrainte équivalente des aciers comprimés à l'ELU lorsque la contrainte de compression du béton est limitée

Dans les cas courants (aciers S 500 et $f_{ck} \leq 35$ MPa) :

$$\sigma_{s2,\,e} = \gamma.\sigma_{s2,\,ser} = \gamma.\alpha_e.\overline{\sigma_c}\left(1 - \frac{\delta'}{\alpha_{1l}}\right) = \gamma.\alpha_e.0{,}6.f_{ck}\left(1 - \frac{\delta'}{\alpha_{1l}}\right)$$

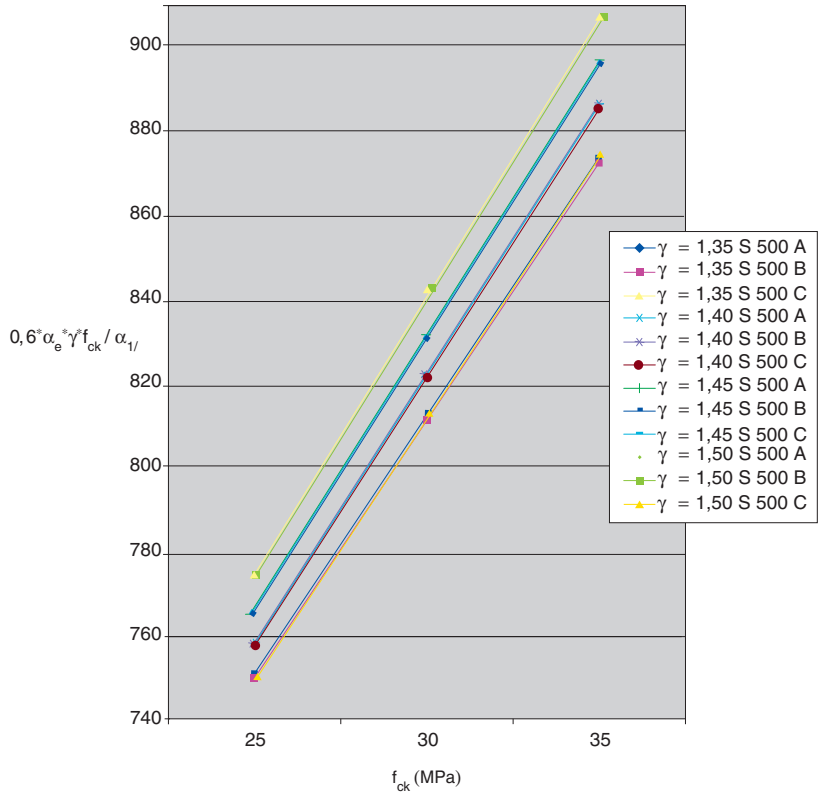
$\sigma_{s2,\,e} = 0{,}6.\alpha_e.\gamma.f_{ck}\left(1 - \frac{\delta'}{\alpha_{1l}}\right) \leq \sigma_{s2,\,u}$ et la section d'aciers comprimés A_{s2} est déterminée à l'ELS.

La quantité $0{,}6.\alpha_e.\gamma.f_{ck}/\alpha_{1l}$ est sensiblement constante pour $f_{ck} \leq 35$ MPa :

$\frac{0{,}6.\alpha_e.\gamma.f_{ck}}{\alpha_{1l}}$	$\alpha_e = 15$								
	S 500 A			S 500 B			S 500 C		
	$f_{ck} = 25$	30	35	25	30	35	25	30	35
$\gamma = 1{,}35$	751,24	811,99	872,97	749,88	810,91	872,05	750,93	811,71	872,70
1,40	759,25	821,94	884,88	758,08	821,02	884,10	758,95	821,71	884,67
1,45	767,11	831,71	896,58	766,11	830,92	895,93	766,90	831,51	896,38
1,50	774,80	841,27	907,98	773,95	840,60	907,47	774,58	841,09	907,88
Moyenne	763,10	826,73	890,60	762,01	825,86	889,89	762,84	826,51	890,41
Écart (%)	3,1	3,5	3,9	3,2	3,6	4,0	3,1	3,6	4,0

Dans le tableau ci-devant, l'écart est mesuré entre les valeurs extrêmes pour f_{ck} donné lorsque γ varie,

Ce qui conduit à la représentation graphique suivante :



S 500 : α_e = 15 – valeurs de $\frac{0,6.\alpha_e.\gamma.f_{ck}}{\alpha_{ll}}$

On en déduit :

$$\sigma_{s2e} = 0,6.\alpha_e.\gamma.f_{ck}\left(1-\frac{\delta'}{\alpha_{ll}}\right) = 0,6.\alpha_e.\gamma.f_{ck} - \delta'\frac{0,6.\alpha_e.\gamma.f_{ck}}{\alpha_{ll}}$$

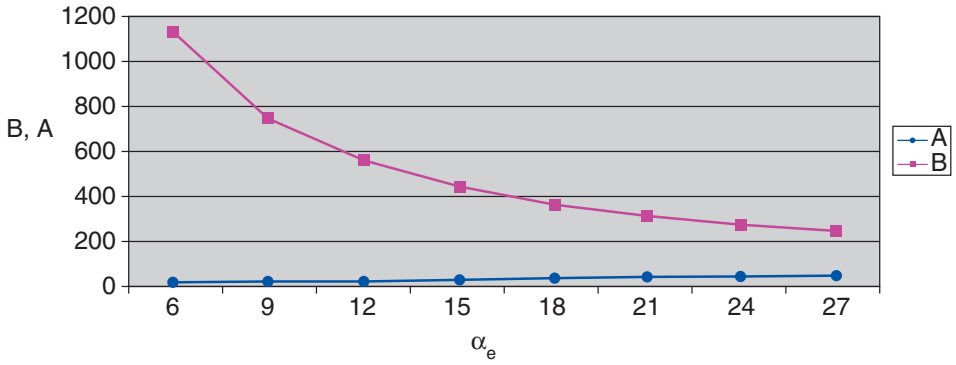
$$\sigma_{s2e} = 0,6.\alpha_e.\gamma.f_{ck} - \delta'.\Delta$$

avec pour valeur de la constante Δ :
$\Delta = A.f_{ck} + B$

Pour tenir compte de la variation des coefficients A et B en fonction du coefficient d'équivalence α_e, on pose :

$$\begin{cases} A = \dfrac{a}{\alpha_e} + b \\ B = \dfrac{c}{\alpha_e} + d \end{cases}$$

La représentation graphique de la variation des coefficients A et B en fonction de α_e étant la suivante :



Coefficients : $A*f_{ck} + B$

D'où la formule approchée pour les aciers S 500 avec diagramme σ–ε à palier incliné :

$$\sigma_{s2,\,e} = 0,6.\alpha_e.\gamma.f_{ck} - \delta'\left(A.f_{ck} + B\right) \text{ (MPa)} \qquad [7.37]$$

avec :

$$\begin{cases} A = -\dfrac{5}{\alpha_e} + 13 \\ B = \dfrac{6\,855}{\alpha_e} - 9 \end{cases}$$

Par ailleurs, pour les aciers S 500 avec diagramme σ–ε à palier horizontal, un calcul du même type, donne :

$$\sigma_{s2,\,e} = 0,6.\alpha_e.\gamma.f_{ck} - \delta'\left(A.f_{ck} + B\right) \text{ (MPa)} \qquad [7.38]$$

avec :

$$\begin{cases} A = \dfrac{0,5}{\alpha_e} + 13 \\ B = \dfrac{6\,517}{\alpha_e} + 1 \end{cases}$$

Remarque

Dans le cas des ponts, si α_{cc} est différent de 1, il convient de considérer, pour l'application des formules ci-dessus, un béton fictif de résistance caractéristique égale à $\alpha_{cc}.f_{ck}$ (voir remarque, § 2.4).

3.3.4 Contrainte équivalente des aciers tendus A_1 lorsque la contrainte de compression du béton est limitée

Nous avons établi au § 3.3.3 que, pour des aciers S 500 avec diagramme σ–ε à palier incliné avec $f_{ck} \leq 35$ MPa :

$$\sigma_{s2,\,e} = 0{,}6.\alpha_e.\gamma.f_{ck}\left(1 - \frac{\delta'}{\alpha_{1l}}\right) = 0{,}6.\alpha_e.\gamma.f_{ck} - \delta'[A.f_{ck} + B]$$

En posant $k = \dfrac{1}{\alpha_{1l}}$, il vient (par identification avec les formules [7.37] et [7.38]) :

$$\sigma_{s2,\,e} = 0{,}6.\alpha_e.\gamma.f_{ck}\,(1 - k.\delta') \text{ avec : } k = \frac{A.f_{ck} + B}{0{,}6.\alpha_e.\gamma.f_{ck}}$$

Comme :

$$\gamma.\sigma_{s1,\,ser} = 0{,}6.\alpha_e.\gamma.f_{ck}\left(\frac{1}{\alpha_{1l}} - 1\right) = 0{,}6.\alpha_e.\gamma.f_{ck}(k - 1)$$

Nous pouvons retenir :

$$\gamma.\sigma_{s1,\,ser} = 0{,}6.\alpha_e.\gamma.f_{ck}\left(\frac{A.f_{ck} + B}{0{,}6.\alpha_e.\gamma.f_{ck}} - 1\right)$$

soit :

$$\boxed{\sigma_{s1,\,e} = \left(A.f_{ck} + B\right) - 0{,}6.\alpha_e.\gamma.f_{ck}} \text{ (MPa)} \qquad [7,\,39]$$

avec :

$$\boxed{\begin{cases} A = -\dfrac{5}{\alpha_e} + 13 \\ B = \dfrac{6\,855}{\alpha_e} - 9 \end{cases}}$$

De la même manière, pour les aciers S 500 avec diagramme σ–ε à palier horizontal et $f_{ck} \leq 35$ MPa, on peut établir que :

$$\boxed{\sigma_{s1,\,e} = \left(A.f_{ck} + B\right) - 0{,}6.\alpha_e.\gamma.f_{ck} \leq 435 \text{ MPa}} \text{ (MPa)} \qquad [7{,}40]$$

avec :

$$\boxed{\begin{cases} A = \dfrac{0{,}5}{\alpha_e} + 13 \\ B = \dfrac{6\,517}{\alpha_e} + 1 \end{cases}}$$

Remarque

Dans le cas des ponts, si α_{cc} est différent de 1, il convient de considérer, pour l'application des formules ci-dessus, un béton fictif de résistance caractéristique égale à $\alpha_{cc}.f_{ck}$ (voir remarque, § 2.4).

4. Section rectangulaire dimensionnée à l'état limite de service par limitation des contraintes

4.1 État limite de service par limitation des contraintes

La limitation des contraintes[8] :

- du béton comprimé ;
- des armatures tendues ;

en service a pour but de limiter la fissuration.

La contrainte de l'acier en service est limitée[9] :

- sous les combinaisons caractéristiques de charges à :

$$\boxed{\overline{\sigma_s} = k_3.f_{yk}} \qquad [7.41]$$

avec : $k_3 = 0{,}8$: valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[10].

- sous l'effet des seules déformations imposées à :

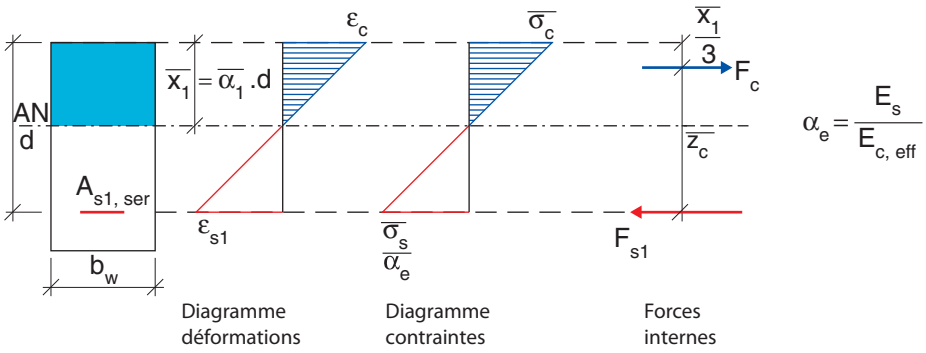
$$\boxed{\overline{\sigma_s} = k_4.f_{yk}} \qquad [7.42]$$

avec : $k_4 = 1$: valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[11].

Dans les cas courants ($f_{ck} \leq 50$ MPa et aciers S 500), la contrainte de l'acier en service d'une section dimensionnée à l'état limite ultime est telle que : $0{,}5.f_{yd} \leq \sigma_s \leq 0{,}8.f_{yk}$. Le dimensionnement à l'ELS par limitation de la contrainte des aciers tendus est inutile et le développement qui suit n'est donc donné qu'à titre indicatif.

8. EC 2 – 7.2
9. EC 2 – 7.2 (5)
10. EC 2 – voir AN
11. EC 2 – voir AN

4.2 Notion de moment résistant béton : M_{rc}



Moment résistant béton = moment pour lequel on atteint l'état limite de service par compression du béton ($\sigma_c = \overline{\sigma_c}$) lorsque la contrainte de l'acier tendu σ_{s1} est invariable et égale à sa valeur à l'état limite d'ouverture des fissures : $\overline{\sigma_s}$

On a donc pour $\alpha_e = \dfrac{E_s}{E_{c,\,eff}}$:

$$\overline{\alpha_1} = \frac{\overline{x_1}}{d} = \frac{\alpha_e.\overline{\sigma_c}}{\alpha_e.\overline{\sigma_c} + \overline{\sigma_s}}$$

$$F_c = \frac{1}{2} b_w.\overline{x_1}.\overline{\sigma_c}$$

$$\overline{z_c} = d - \frac{\overline{x_1}}{3}$$

$$M_{rc} = F_c.\overline{z_c} = \frac{1}{2} b_w.\overline{x_1}.\overline{\sigma_c}\left(d - \frac{\overline{x_1}}{3}\right)$$

D'où le moment résistant béton réduit :

$$\boxed{\mu_{rc} = \frac{M_{rc}}{b_w.d^2.\overline{\sigma_c}} = \frac{1}{2}\overline{\alpha_1}\left(1 - \frac{\overline{\alpha_1}}{3}\right)} \qquad [7.43]$$

4.3 Calcul des armatures

4.3.1 Cas où $M_{ser} \leq M_{rc}$

On a $\sigma_c \leq \overline{\sigma_c}$ avec $\sigma_{s1} = \overline{\sigma_s}$, d'où $A_{s2} = 0$.

Les équations pour le calcul des armatures tendues sont :

$$M_{ser} = \frac{1}{2}\alpha_1\left(1-\frac{\alpha_1}{3}\right)b_w.d^2.\sigma_c$$

avec :

$$\sigma_c = \frac{\overline{\sigma_s}}{15}.\frac{\alpha_1}{1-\alpha_1} \text{ (relation dans les triangles semblables)}$$

$$z_c = d\left[1-\frac{\alpha_1}{3}\right]$$

On en déduit :

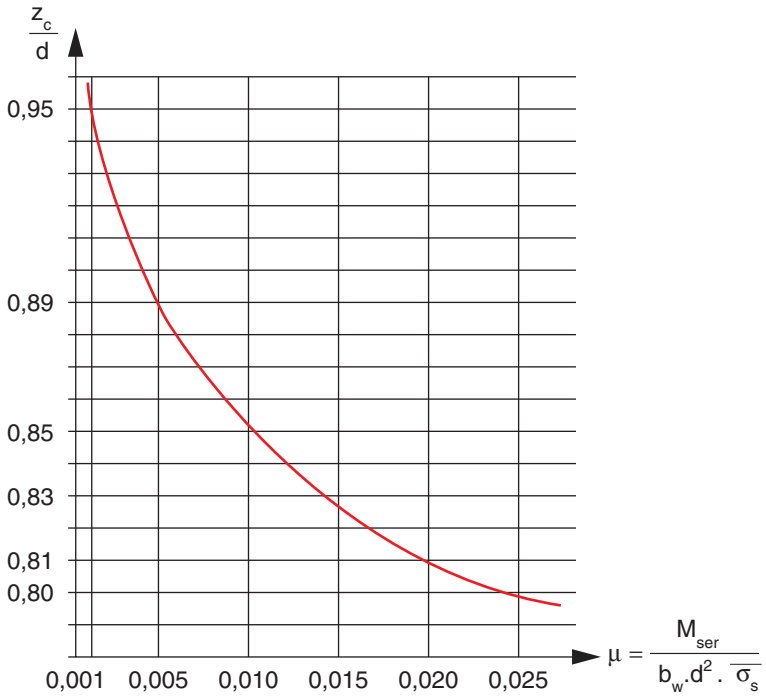
$$M_{ser} = \frac{\overline{\sigma_s}}{2.\alpha_e}.\frac{\alpha_1^2\left(1-\frac{\alpha_1}{3}\right)}{1-\alpha_1}b_w.d^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{M_{ser}}{b_w.d^2.\overline{\sigma_s}} = \frac{1}{2.\alpha_e}.\frac{\alpha_1^2\left(1-\frac{\alpha_1}{3}\right)}{1-\alpha_1} = \mu$$

$\Rightarrow$ α_1 par résolution de cette équation du troisième degré en α_1.

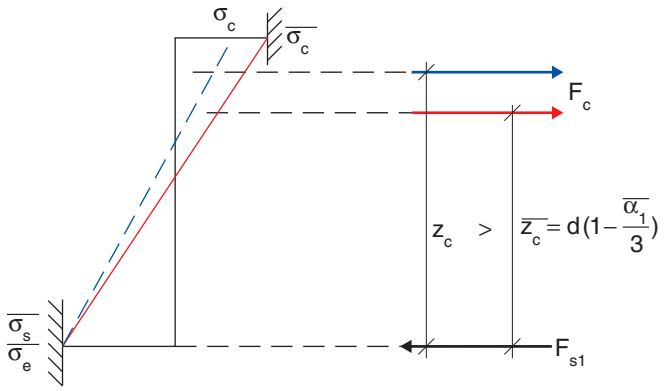
$$\Rightarrow \quad z_c = d\left[1-\frac{\alpha_1}{3}\right]$$

$$\Rightarrow \quad A_{s1,\ ser} = \frac{M_{ser}}{z_c.\overline{\sigma_s}}$$

Pour $\alpha_e = 15$, la représentation graphique de $z_c/d = f(\mu)$ est la suivante :



En pratique, on utilise une valeur approchée par défaut de z_c qui conduit à une section $A_{s1,\ ser}$ par léger excès :



$$\overline{\alpha_1} = \frac{\alpha_e . \overline{\sigma_c}}{\alpha_e . \overline{\sigma_c} + \overline{\sigma_s}} \qquad [7.44]$$

$$\Rightarrow \quad \overline{z_c} = d\left[1 - \frac{\overline{\alpha_1}}{3}\right] \qquad [7.45]$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{A_{s1,\,ser} = \frac{M_{ser}}{\overline{z_c}.\overline{\sigma_s}}} \qquad [7.46]$$

4.3.2 Cas où $M_{ser} > M_{rc}$ et où A_{s2} n'est pas imposée

On a $\sigma_c > \overline{\sigma_c}$, d'où il faut des aciers comprimés A_{s2}.

On décompose la section réelle en deux sections fictives (voir § 3.1.2) :

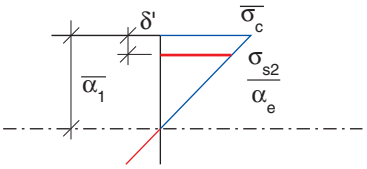
- une section fictive ① de largeur b_w sans aciers comprimés ;
- une section fictive ② sans béton munie de la section A_{s2} d'aciers comprimés.

4.3.2.1 Section A_{s2} d'aciers comprimés

La section fictive ① équilibrant M_{rc}, on a :

$$\overline{\alpha_1} = \frac{\alpha_e.\overline{\sigma_c}}{\alpha_e.\overline{\sigma_c} + \overline{\sigma_s}}$$

$$\sigma_{s2} = \alpha_e.\overline{\sigma_c}\,\frac{\overline{\alpha_1} - \delta'}{\overline{\alpha_1}} \quad \text{avec} \quad \delta' = \frac{d'}{d} \qquad [7.47]$$



$$\boxed{A_{s2} = \frac{M_{ser} - M_{rc}}{(d - d').\sigma_{s2}}} \text{ dans la section ② avec } A_{s2}\,. \qquad [7.48]$$

4.3.2.2 Section $A_{s1,\,ser}$ d'aciers tendus

Dans la section fictive ① sans aciers comprimés :

$$A_1 = \frac{M_{rc}}{\overline{z_c}.\overline{\sigma_s}} \quad \text{avec} \quad \overline{z_c} = d\left[1 - \frac{\overline{\alpha_1}}{3}\right]$$

Dans la section fictive ② avec aciers comprimés :

$$A_2 = A_{s2}\,\frac{\sigma_{s2}}{\overline{\sigma_s}}$$

D'où au total :

$$A_{s1,\,ser} = A_1 + A_2 = \frac{M_{rc}}{\overline{z_c}.\overline{\sigma_s}} + A_{s2}\frac{\sigma_{s2}}{\overline{\sigma_s}}$$
$$\overline{z_c} = d\left[1 - \frac{\overline{\alpha_1}}{3}\right] \qquad [7.49]$$

Remarque

La section fictive ① équilibrant M_{rc}, le bras de levier est rigoureusement égal à $\overline{z_c}$.

4.3.3 Calcul des aciers tendus lorsque A_{s2} est imposée

Il faut vérifier si la section A_{s2} est suffisante et correctement ancrée de part et d'autre de la section droite considérée (cf. § 3.1.1), c'est-à-dire :

$$\overline{\alpha_1} = \frac{\alpha_e.\overline{\sigma_c}}{\alpha_e.\overline{\sigma_c} + \overline{\sigma_s}} \quad \text{et} \quad \delta' = \frac{d'}{d}$$

$$\Rightarrow \quad \sigma_{s2} = \alpha_e.\overline{\sigma_c}\,\frac{\overline{\alpha_1} - \delta'}{\overline{\alpha_1}}$$

$$\Rightarrow \quad A_{s2} \geq \frac{M_{ser} - M_{rc}}{(d - d').\sigma_{s2}}$$

S'il en est bien ainsi :

- la section rectangulaire ① sans aciers comprimés doit équilibrer :

$$M_1 = M_{ser} - A_{s2}.\sigma_{s2}\,(d - d') < M_{rc} \quad \text{par hypothèse}$$

$$\Rightarrow \quad \overline{z_c} = d\left[1 - \frac{\overline{\alpha_1}}{3}\right]$$

$$\Rightarrow \quad A_1 = \frac{M_1}{\overline{z_c}.\overline{\sigma_s}}$$

- l'équilibre des forces dans la section fictive ② avec aciers comprimés donne :

$$A_2.\overline{\sigma_s} = A_{s2}.\sigma_{s2} \quad \Rightarrow \quad A_2 = A_{s2}\frac{\sigma_{s2}}{\overline{\sigma_s}}$$

• d'où la section totale d'aciers tendus vaut :

$$A_{s1,\ ser} = \frac{M_1}{z_c.\sigma_s} + A_{s2}\frac{\sigma_{s2}}{\sigma_s}$$

S'il n'en est pas ainsi, A_{s2} est insuffisante, et il faut recalculer une nouvelle section d'aciers comprimés A_{s2} puis déterminer les aciers tendus $A_{s1,\ ser}$ comme indiqué au § 4.3.2.

4.4 Conclusion

Un niveau de fissuration inacceptable est évité si, $A_{s1,\ ser}$ étant la section calculée au § 4.3, la section d'armatures longitudinales tendues est obtenue comme suit :

$$\begin{cases} \text{S 500 : } A = \text{Max}\left[A_{s1,\ u}, A_{s1,\ ser}\right] = A_{s1,\ u}, \\ \text{S 400 : } A = \text{Max}\left[A_{s1,\ u}, A_{s1,\ ser}\right]. \end{cases}$$

5. Coffrage des sections rectangulaires

Il est obtenu en écrivant qu'il ne faut pas d'aciers comprimés.

$$M_{Ed} \le M_{lu} = \mu_{lu}.b_w.d^2.f_{cu} \quad \Rightarrow \quad \boxed{b_w.d^2 \ge \frac{M_{Ed}}{\mu_{lu}.f_{cu}}} \qquad [7.50]$$

La valeur de $M_{lu} = \mu_{lu}.b_w.d^2.f_{cu}$ est calculée comme indiqué aux § 2.3.1 ou 2.3.2 suivant :

• que la contrainte de compression du béton est limitée ou non ;

• que l'on utilise des aciers avec diagramme σ–ε à palier incliné ou non.

Pour déterminer la seconde inconnue du problème, une règle de bonne construction consiste à prendre :

$$\boxed{0,3.d \le b_w \le 0,5.d} \qquad [7.51]$$

Si l'inconnue est d, il faut adopter, si possible, une valeur supérieure à d_{min} pour réaliser une économie d'aciers car :

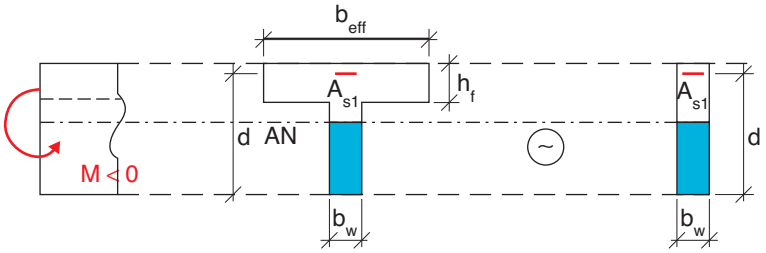
$$A = \frac{M}{z.\sigma_s} \text{ avec } z = \beta.d.$$

Si d est imposée par ailleurs (conditions architecturales par exemple) il faut calculer b_w par l'équation. [7.50]

6. Sections en T

6.1 Introduction

Dans le cas d'une section soumise à un moment négatif, comme on néglige le béton tendu, on en revient à l'étude d'une section rectangulaire de largeur b_w :



Dans le cas d'une section soumise à un moment positif, comme la table est le plus souvent surabondante vis-à-vis de la compression, on n'a généralement nul besoin d'aciers comprimés. Nous ne nous intéresserons donc qu'aux sections en T sans aciers comprimés.

6.2 Largeur de table à prendre en compte

Il s'agit de la largeur participante[12] définie au § 2.2 du chapitre 1 : « Analyse structurale », de l'ouvrage *Maîtrise de l'eurocode 2*, J. Roux, Éditions Eyrolles, 2009.

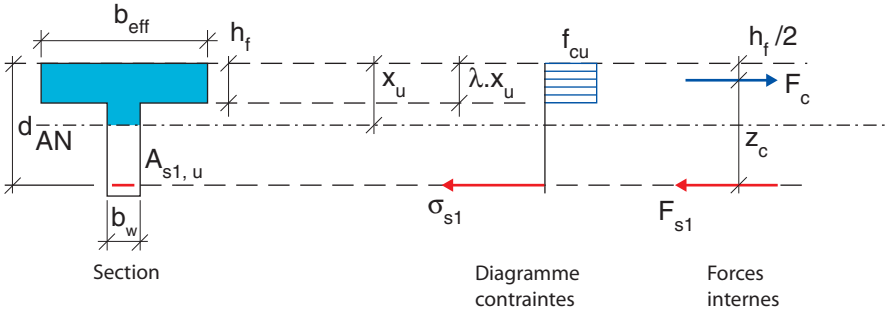
6.3 Dimensionnement à l'ELU

6.3.1 Moment de référence

Ce moment est un moment-frontière qui sépare les cas où la zone comprimée de la section a une forme rectangulaire de largeur égale à celle de la table, de ceux où la zone comprimée a une forme de T.

Moment équilibré par la seule table uniformément comprimée sur toute sa hauteur sous f_{cu} :

12. EC 2 – 5.3.2.1 (4)



$$F_c = b_{eff}.h_f.f_{cu}$$

$$z_c = d - \frac{h_f}{2}$$

$$M_{Tu} = F_c.z_c$$

D'où :

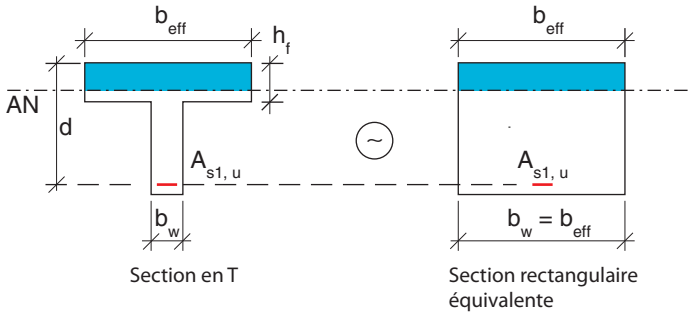
$$\boxed{M_{Tu} = b_{eff}.h_f.f_{cu}\left(d - \frac{h_f}{2}\right)} \qquad [7.52]$$

6.3.2 Calcul des armatures

6.3.2.1 Cas où $M_{Ed} \leq M_{Tu}$

La zone comprimée a une forme rectangulaire de largeur b_{eff} et $\lambda.x_u \leq h_f$.

⇒ Le béton tendu étant négligé, calcul en section rectangulaire de largeur b_{eff}.



6.3.2.2 Cas où $M_{Ed} \geq M_{Tu}$

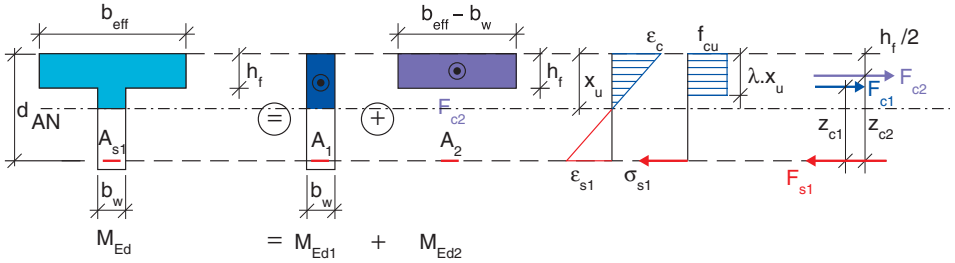
La table est insuffisante pour équilibrer à elle seule M_{Ed} et $\lambda.x_u > h_f$. Une partie de la nervure est donc comprimée. On opère par décomposition de la section réelle en deux sections fictives :

1/ une section rectangulaire ① :

- de largeur b_w ;
- de hauteur utile d ;
- dont l'armature tendue est constituée par une fraction A_1 de la section totale A_{s1} ;
- qui équilibre une fraction M_{Ed1} du moment total M_{Ed} ;

2/ une section en T ② :

- avec une table de largeur $b_{eff} - b_w$ et de hauteur h_f ;
- d'épaisseur d'âme nulle ;
- de hauteur utile d ;
- dont l'armature tendue est constituée par la fraction $A_2 = A_{s1} - A_1$ de la section totale A_{s1} ;
- qui équilibre une fraction $M_{Ed2} = M_{Ed} - M_{Ed1}$ du moment total M_{Ed}.



Dans la section fictive ② :

$$F_{c2} = (b_{eff} - b_w) h_f . f_{cu} = A_2 . \sigma_{s1}$$

$$z_{c2} = d - \frac{h_f}{2}$$

$$M_{Ed2} = F_{c2} . z_{c2} = (b_{eff} - b_w) h_f . f_{cu} \left(d - \frac{h_f}{2} \right) = M_{Tu} \frac{b_{eff} - b_w}{b_{eff}}$$

Dans la section fictive ① :

$$M_{Ed1} = M_{Ed} - M_{Ed2} = M_{Ed} - M_{Tu} \frac{b_{eff} - b_w}{b_{eff}} \quad \Rightarrow \quad \mu_{cu} = \frac{M_{Ed1}}{b_w . d^2 . f_{cu}}$$

$$\left.\begin{array}{l} \Rightarrow \quad \alpha_u = \dfrac{1}{\lambda}\left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{cu}}\right] \\ \Rightarrow \quad z_c = d\left[1 - \dfrac{\lambda}{2}\alpha_u\right] \end{array}\right\} \text{ ou } \left\{ \begin{array}{l} z_c = d\left[1 - 0,6.\mu_{cu}\right] \text{ si } \mu_{cu} \le 0,225 \\ \text{(cf. § 3.3.1.).} \end{array}\right.$$

$$\Rightarrow \quad \mu_{AB} = \begin{cases} 0{,}1019 : \text{classe de ductilité A,} \\ 0{,}0561 : \text{classe de ductilité B,} \\ 0{,}0387 : \text{classe de ductilité C,} \end{cases} \Big\} \text{ diagramme } \sigma - \varepsilon \text{ à palier incliné}$$

$$0 \ \Big\} \text{ diagramme } \sigma - \varepsilon \text{ à palier horizontal}$$

ou valeurs tirées du tableau du § 2.1.3 si $f_{ck} \geq 55$ MPa

$$\Rightarrow \quad \mu_{cu} \leq \mu_{AB} \quad \Rightarrow \quad \text{Pivot A} \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{s1} = \varepsilon_{ud} = \begin{cases} 22{,}5 / 1\,000 : \text{classe de ductilité A,} \\ 45 / 1\,000 \ : \text{classe de ductilité B,} \\ 67{,}5 / 1\,000 : \text{classe de ductilité C,} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \quad \mu_{cu} > \mu_{AB} \quad \Rightarrow \quad \text{Pivot B} \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_c = 3{,}5 / 1\,000 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{s1} = \varepsilon_c \frac{1 - \alpha_u}{\alpha_u}$$

$$\Rightarrow \quad \sigma_{s1} \text{ par le diagramme de calcul des aciers}$$

$$\Rightarrow \quad A_1 = \frac{M_{Ed1}}{z_c . \sigma_{s1}}$$

Total :

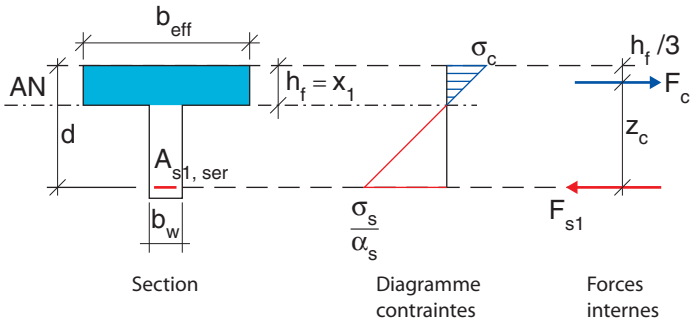
$$A_{s1,\,u} = A_1 + A_2$$

$$\boxed{A_{s1,\,u} = \frac{M_{Ed} - M_{Tu} \dfrac{b_{eff} - b_w}{b_{eff}}}{z_c . \sigma_{s1}} + \frac{(b_{eff} - b_w) h_f . f_{cu}}{\sigma_{s1}}} \qquad [7.53]$$

6.4 Dimensionnement à l'ELS

6.4.1 Moment de référence

Ce moment est un moment-frontière qui sépare les cas où la zone comprimée de la section a une forme rectangulaire de largeur égale à celle de la table, de ceux où la zone comprimée a une forme de T.



$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{c,\,eff}}$$

Moment équilibré par la seule table entièrement comprimée pour atteindre $\overline{\sigma_s}$ dans les aciers tendus :

$$M_{Tser} = \frac{1}{2} b_{eff} . h_f . \sigma_c \left(d - \frac{h_f}{3} \right)$$

$$\sigma_c = \frac{\overline{\sigma_s}}{\alpha_e} . \frac{h_f}{d - h_f}$$

D'où :

$$\boxed{M_{Tser} = \frac{\overline{\sigma_s}}{2.\alpha_e} . \frac{d - \frac{h_f}{3}}{d - h_f} b_{eff} . h_f^2} \qquad [7.54]$$

Cette valeur est environ dix à quinze fois plus faible que M_{Tu}, avec $M_{Ed} = \gamma . M_{ser} \leq 1,5 . M_{ser}$. On a donc, le plus souvent : $M_{ser} > M_{Tser}$.

6.4.2 Calcul de $A_{s1,\ ser}$

6.4.2.1 Cas où $M_{ser} \leq M_{Tser}$

La zone comprimée a une forme rectangulaire de largeur b_{eff}.

Considérer la section rectangulaire de largeur b_{eff}, mais prendre ici comme valeur approchée de z_c conduisant à une section d'armatures par léger excès :

$z_c = d - \frac{h_f}{3}$ (voir remarque du § 4.3.1 pour le principe)

6.4.2.2 Cas où $M_{ser} > M_{Tser}$

La table est insuffisante pour équilibrer seule M_{ser}. Une partie de la nervure est comprimée. Le calcul exact exige des itérations (équilibre du moment de service à partir d'un diagramme des contraintes défini par $\overline{\sigma_s}$ pour les aciers tendus et σ_c compris entre $\frac{\overline{\sigma_s}}{\alpha_e} . \frac{h_f}{d - h_f}$ et $\overline{\sigma_c}$ pour le béton le plus comprimé).

Le bras de levier est donné par des expressions approchées :

$$\left.\begin{array}{l} z_c = 0,99.d - 0,4.h_f \\ \text{ou} \\ z_c = d - \frac{h_f}{2} \end{array}\right\} \text{ : planchers des bâtiments,} \qquad [7.55]$$

$z_c = 0,93.d$: ouvrages d'art, [7.56]

D'où :

$$\boxed{A_{s1,\ ser} = \frac{M_{ser}}{z_c . \overline{\sigma_s}}} \qquad [7.57]$$

7. Pourcentage minimal d'armatures

Il faut vérifier (valeurs recommandées et à utiliser pour l'Annexe nationale française[13]) :

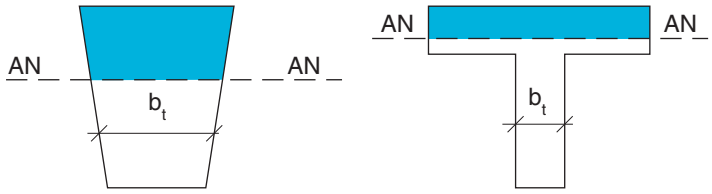
$$A_{s1} \geq A_{s,\,min} = \text{Max}\begin{cases} 0,26\dfrac{f_{ct,\,eff}}{f_{yk}} b_t.d \\ 0,0013.b_t.d \end{cases} \qquad [7.58]\ \textbf{(9.1N)}$$

avec[14] :

$$f_{ct,\,eff} = \begin{cases} f_{ctm} : \text{si la maîtrise de la fissuration est requise,} \\ f_{ctm,\,fl} = \text{Max}\begin{cases} \left(1,6 - \dfrac{h}{1\ 000}\right) f_{ctm} \\ f_{ctm} \end{cases} : \text{dans les autres cas,} \end{cases} \qquad \textbf{(3.23)}$$

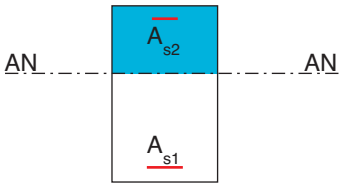
h = hauteur de la section droite en mm,

b_t = largeur moyenne de la zone tendue :



A_{s1} comprenant les armatures de peau éventuelles (voir § 10, chapitre 4 : « Dispositions constructives »).

En dehors des zones de recouvrement, il faut vérifier[15] :



A_{s1} et $A_{s2} \leq 0,04.A_c$ valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[26].

A_c = aire de la section transversale de béton.

Lorsque la maîtrise de la fissuration est requise, la section effective des armatures longitudinales de traction ne doit pas être inférieure à la section nécessaire au contrôle de la fissuration (voir § 3.1 du chapitre 3 : « État limite de service de fissuration[17] », *Maîtriser l'eurocode 2*, J. Roux, Éditions Eyrolles, 2009).

13. EC 2 – 9.2.1.1 (1) + voir AN
14. EC 2 – 7.1 (2)
15. EC 2 – 9.2.1.1 (3)
16. EC 2 – voir AN
17. EC 2 – 9.2.1.1 (1)

8. Vérification des contraintes à l'ELS

8.1 Introduction

La section est supposée non fissurée tant que la contrainte de traction en flexion n'excède pas $f_{ct,\,eff}$[18] (voir § 2.3.1, chapitre 3 : « Béton armé – Généralités »), cette contrainte etant identique à celle utilisée pour le calcul de la section minimale d'armatures (voir § 7).

Dans les cas courants ($f_{ck} \leq 50$ MPa et aciers S 500), la vérification des contraintes à l'ELS en considérant la section non fissurée est inutile car :

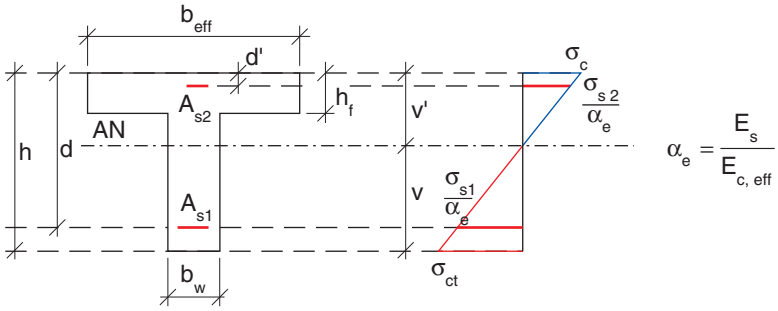
- même si cette section est soumise à de faibles moments fléchissants, elle comporte une section minimale d'armatures supérieure à la section d'aciers tendus strictement nécessaire ;
- les contraintes calculées en considérant la section fissurée sont plus élevées que celles obtenues pour la section non fissurée.

Le § 8.2. qui suit n'est donc donné qu'à titre indicatif.

8.2 Contraintes dans la section non fissurée

8.2.1 Cas des sections en T

Caractéristiques géométriques :



$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{c,\,eff}}$$

$$A_{ch} = b_w.h + (b_{eff} - b_w)h_f + \alpha_e (A_{s1} + A_{s2})$$

$$v' = \frac{\frac{b_w.h^2}{2} + \frac{(b_{eff} - b_w)h_f^2}{2} + \alpha_e (A_{s1}.d + A_{s2}.d')}{A_{ch}}$$

$$v = h - v'$$

18. EC 2 – 7.1 (2)

$$I_{ch} = \frac{b_w.h^3}{3} + \frac{(b_{eff} - b_w)h_f^3}{3} + \alpha_e \left(A_{s1}.d^2 + A_{s2}.d'^2\right) - A_{ch}.v'^2$$

Contraintes :

$\boxed{\sigma_{ct} = \frac{M_{ser}.v}{I_{ch}} \leq f_{ct,\ eff}}$ sinon voir § 8.3, la section étant fissurée,

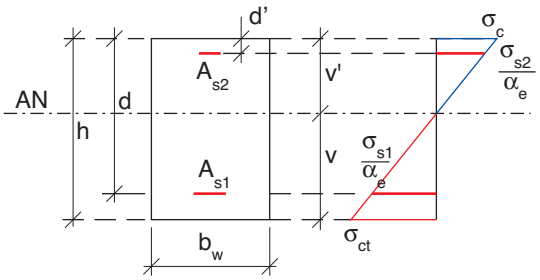
$\boxed{\sigma_c = \frac{M_{ser}.v'}{I_{ch}} \leq \overline{\sigma_c}}$ pour les classes d'exposition XD, XF et XS,

$\boxed{\sigma_{s1} = \alpha_e \frac{M_{ser}(d - v')}{I_{ch}} \leq \overline{\sigma_s}}$

$$\sigma_{s2} = \alpha_e \frac{M_{ser}(v' - d')}{I_{ch}}$$

8.2.2 Cas des sections rectangulaires

Caractéristiques géométriques :



$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{c,\ eff}}$$

$$A_{ch} = b_w.h + \alpha_e \left(A_{s1} + A_{s2}\right)$$

$$v' = \frac{\frac{b_w.h^2}{2} + \alpha_e \left(A_{s1}.d + A_{s2}.d'\right)}{A_{ch}}$$

$$v = h - v'$$

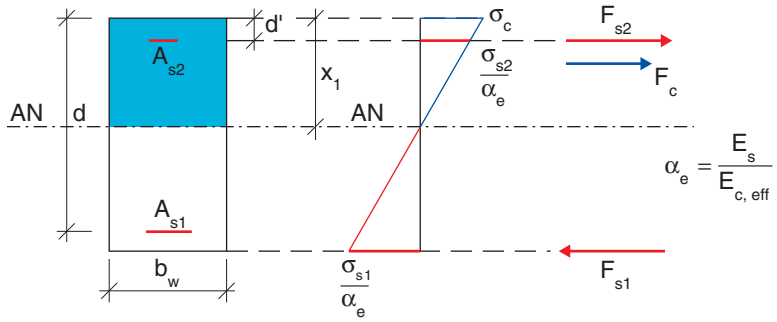
$$I_{ch} = \frac{b_w.h^3}{3} + \alpha_e \left(A_{s1}.d^2 + A_{s2}.d'^2\right) - A_{ch}.v'^2$$

Contraintes : comme indiqué au § 8.2.1.

8.3 Contraintes dans la section fissurée

8.3.1 Position de l'axe neutre

Considérons une section rectangulaire $b_w.d$:



L'équation d'équilibre des forces conduit à :

$$F_c + F_{s2} = F_{s1}$$

soit :

$$\frac{1}{2} b_w.x_1.\sigma_c + A_{s2}.\sigma_{s2} = A_{s1}.\sigma_{s1}$$

Les contraintes σ_{s1} et σ_{s2} valent :

$$\sigma_{s1} = \alpha_e.\sigma_c \frac{d - x_1}{x_1} \text{ et } \sigma_{s2} = \alpha_e.\sigma_c \frac{x_1 - d'}{x_1}.$$

L'équation d'équilibre des forces s'écrit alors :

$$\frac{1}{2} b_w.x_1.\sigma_c + \alpha_e.A_{s2}.\sigma_c \frac{x_1 - d'}{x_1} = \alpha_e.A_{s1}.\sigma_c \frac{d - x_1}{x_1}$$

D'où en éliminant σ_c, on obtient l'équation :

$$\frac{b_w.x_1^2}{2} + \alpha_e.A_{s2}\left(x_1 - d'\right) = \alpha_e.A_{s1}\left(d - x_1\right)$$

qui traduit l'égalité des moments statiques par rapport à l'axe neutre :

- de la zone comprimée d'une part ;
- des aciers tendus de l'autre ;

ou si l'on préfère, que l'axe neutre passe par le centre de gravité de la section homogène réduite.

Pour cette raison, l'équation précédente est appelée « équation des moments statiques ».

$$f(x_1) = \frac{b_w.x_1^2}{2} + \alpha_e.A_{s2}(x_1 - d') - \alpha_e.A_{s1}(d - x_1)$$

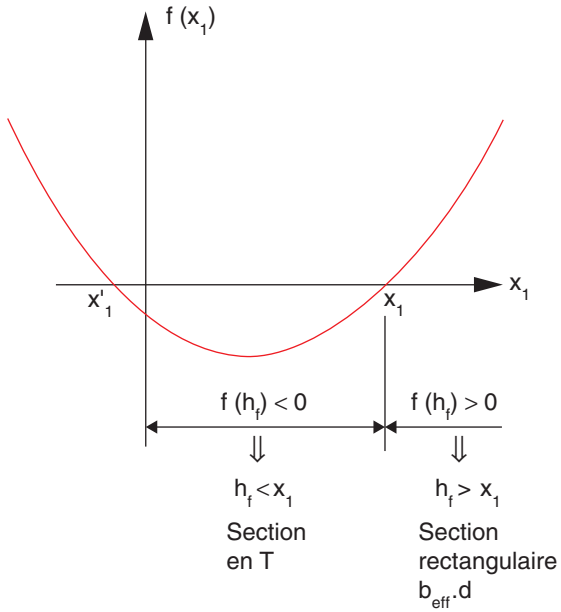
$f(x_1) = 0 \Rightarrow x_1$

Soit une équation du second degré en x_1 avec :

$P = x_1.x'_1 < 0 \Rightarrow$ deux racines x_1 et x'_1 de signe contraire,

$f''(x_1) = b_w > 0 \Rightarrow$ concavité vers les $f(x_1) > 0$

D'où, pour une section en T, on commence par regarder si elle se comporte ou non comme une section rectangulaire de largeur b_{eff} (équation des moments statiques avec b_{eff} au lieu de b_w) :



$f(h_f) < 0 \Rightarrow h_f < x_1$ et l'axe neutre tombe dans la nervure $\Rightarrow$ comportement en section en T,

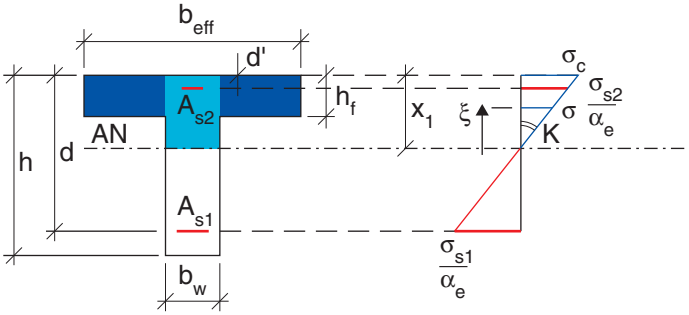
$f(h_f) \geq 0 \Rightarrow h_f \geq x_1$ et l'axe neutre tombe dans la table $\Rightarrow$ comportement en section rectangulaire de largeur b_{eff} .

8.3.2 Calcul des contraintes

8.3.2.1 Cas des sections en T avec $f(h_f) < 0$

$h_f < x_1$ et section en T.

L'axe neutre est défini par :



$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{c,\,eff}}$$

$$K = \frac{\sigma}{\xi} = \frac{M_{ser}}{I_{cf}}$$

$$\frac{b_w.x_1^2}{2} + \left[\left(b_{eff} - b_w\right)h_f + \alpha_e\left(A_{s1} + A_{s2}\right)\right]x_1 - \left[\left(b_{eff} - b_w\right)\frac{h_f^2}{2} + \alpha_e\left(A_{s1}.d + A_{s2}.d'\right)\right] = 0$$

Soit une équation du second degré donnant x_1.

Le moment d'inertie par rapport à l'axe neutre (zone comprimée considérée comme différence de rectangles ayant un côté commun avec l'axe neutre) vaut :

$$I_{cf} = \frac{b_{eff}.x_1^3}{3} - \left(b_{eff} - b_w\right)\frac{\left(x_1 - h_f\right)^3}{3} + \alpha_e.A_{s2}\left(x_1 - d'\right)^2 + \alpha_e.A_{s1}\left(d - x_1\right)^2$$

D'où les contraintes en posant :

$$K = \frac{M_{ser}}{I_{cf}}$$

$\sigma_c = K.x_1 \le \overline{\sigma_c}$ pour les classes d'exposition XD, XF et XS,

$\sigma_{s2} = \alpha_e.K\left(x_1 - d'\right)$

$$\sigma_{s1} = \alpha_e.K\left(d - x_1\right) \le \overline{\sigma_s}$$

8.3.2.2 Cas des sections en T avec f (h_f) ≥ 0

$h_f \ge x_1$ et section rectangulaire de largeur b_{eff}.

Faire $b_w = b_{eff}$ dans les formules ci-dessus.

8.3.2.3 Cas des sections rectangulaires

Dans ce cas, $b_{eff} = b_w$, et les formules du § 8.3.2.1 deviennent :

$$\frac{b_w.x_1^2}{2} + \alpha_e\left(A_{s1} + A_{s2}\right)x_1 - \alpha_e\left(A_{s1}.d + A_{s2}.d'\right) = 0$$

$$I_{cf} = \frac{b_w.x_1^3}{3} + \alpha_e.A_{s2}\left(x_1 - d'\right)^2 + \alpha_e.A_{s1}\left(d - x_1\right)^2$$

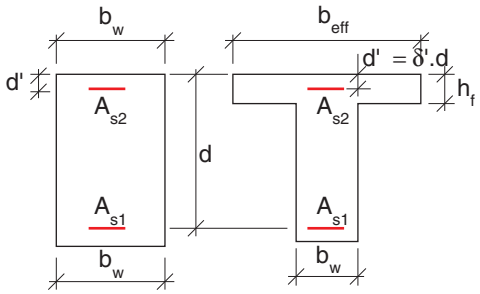
9. Organigrammes récapitulatifs pour les sections rectangulaires ou en T

9.1. Dimensionnement des armatures à l'ELU

9.1.1. Cas où la contrainte de compression du béton est limitée à l'ELS

Classes d'exposition XD, XF et XS.

9.1.1.1. Diagramme σ–ε des aciers à palier incliné



■ Sollicitations :

M_{Ed}, M_{ser}.

■ Matériaux :

f_{ck},

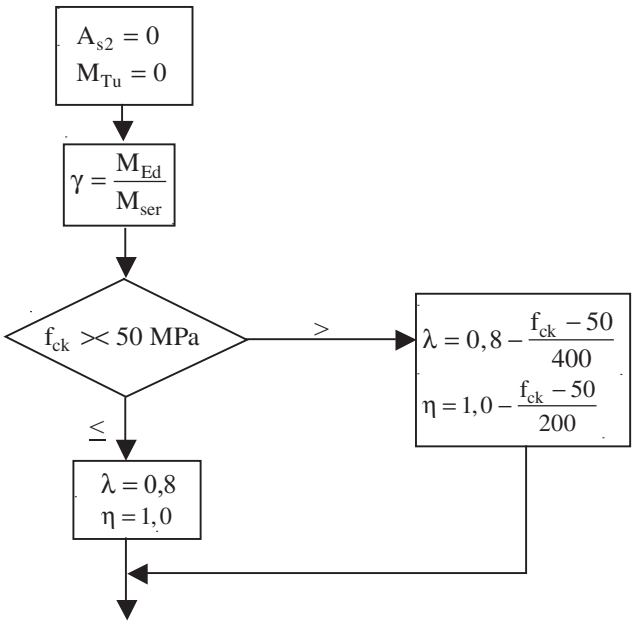
$f_{yd} = \dfrac{f_{yk}}{\gamma_s}$ et classe de ductilité,

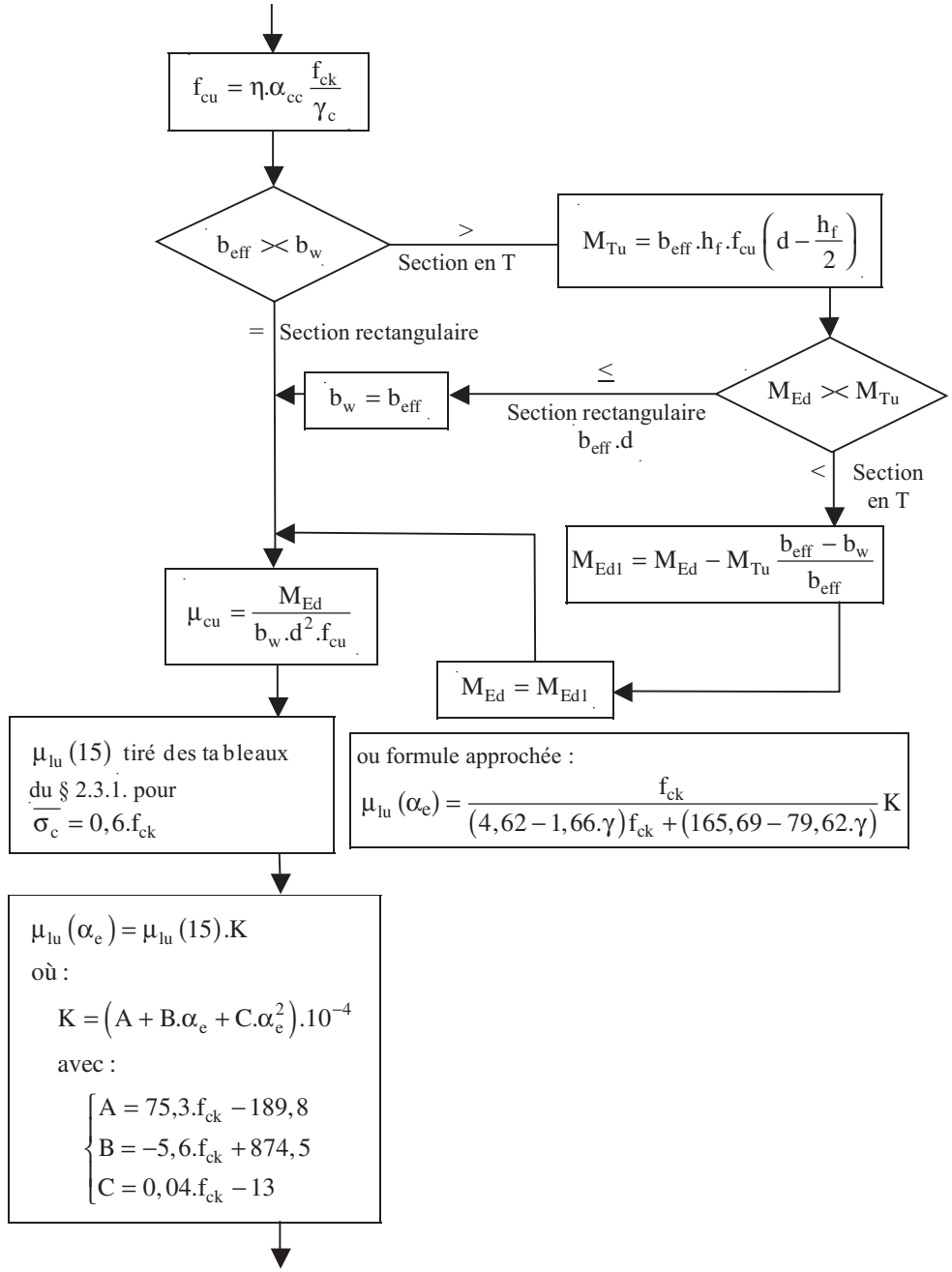
$E_s = 2.10^5$ MPa,

ε_{cu2} ou ε_{cu3},

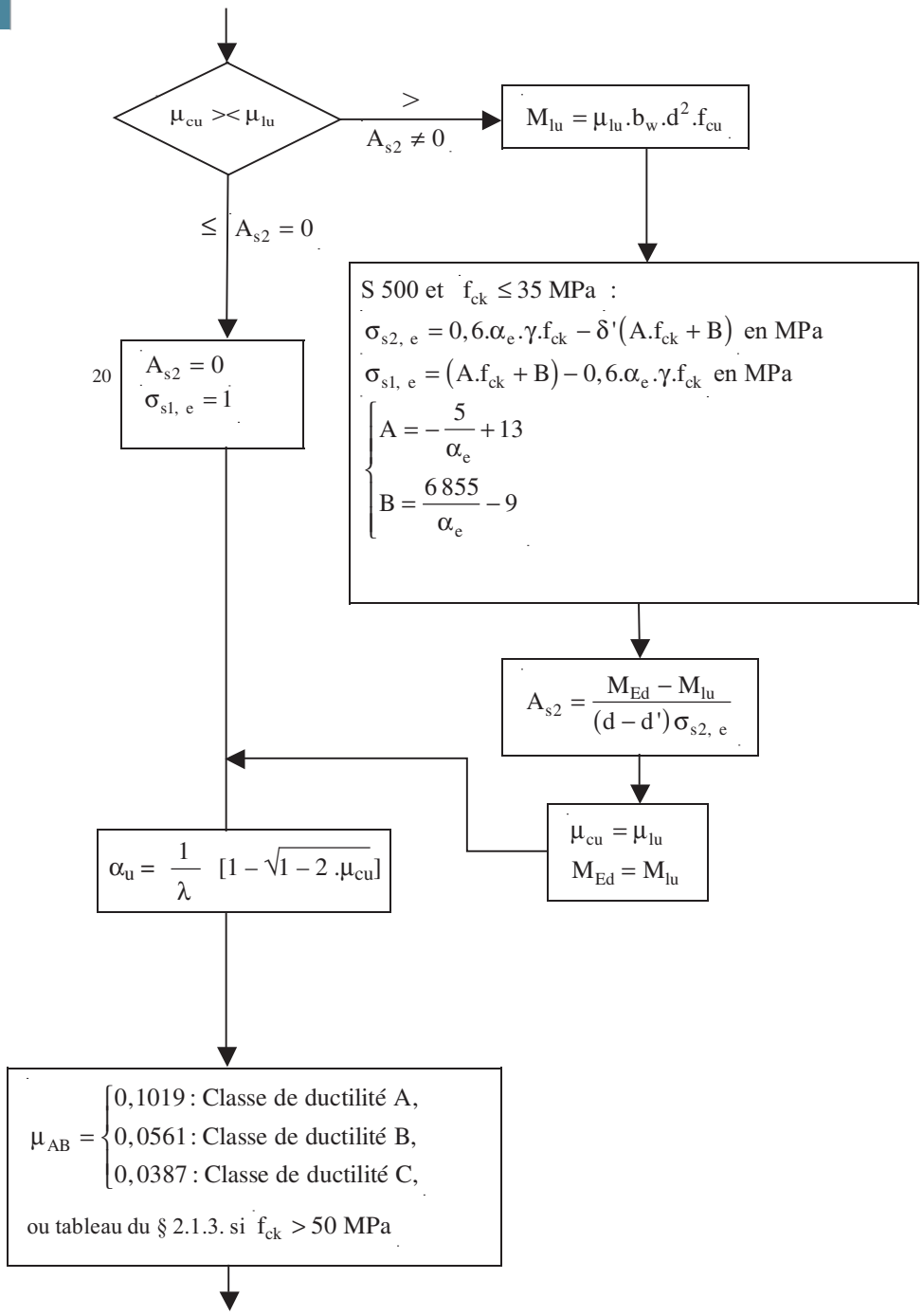
type de diagramme σ–ε des aciers,

$\alpha_e = \dfrac{E_s}{E_{c,\,eff}}$.

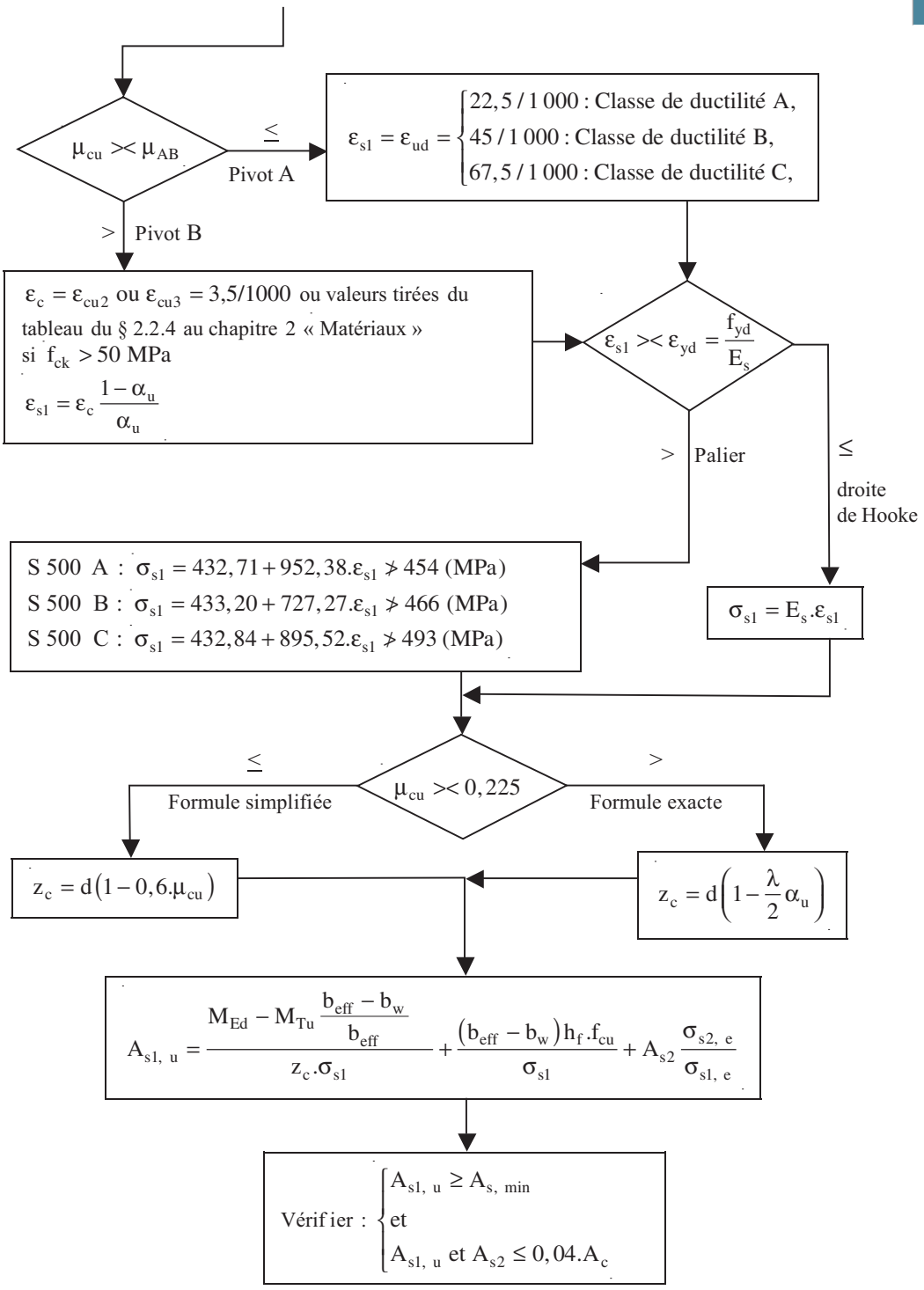




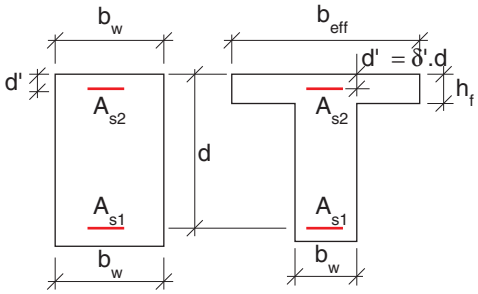
19. Dans le cas des ponts, si α_{cc} est différent de 1, prendre μ_{lu} (15) correspondant à la classe de résistance fictive $\alpha_{cc}.f_{ck}$.



20. $\sigma_{s1,\,e} \neq 0$ pour éviter une division par 0 dans la formule finale donnant $A_{s1,\,u}$.


$\mu_{cu} \gtrless \mu_{AB}$
$\leq$
Pivot A
$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{ud} = \begin{cases} 22,5/1\,000 : \text{Classe de ductilité A,} \\ 45/1\,000 : \text{Classe de ductilité B,} \\ 67,5/1\,000 : \text{Classe de ductilité C,} \end{cases}$
$>$ Pivot B
$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu2}$ ou $\varepsilon_{cu3} = 3,5/1000$ ou valeurs tirées du tableau du § 2.2.4 au chapitre 2 « Matériaux »
si $f_{ck} > 50$ MPa
$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_c \dfrac{1-\alpha_u}{\alpha_u}$
$\varepsilon_{s1} \gtrless \varepsilon_{yd} = \dfrac{f_{yd}}{E_s}$
$>$ Palier
$\leq$
droite de Hooke
S 500 A : $\sigma_{s1} = 432,71 + 952,38.\varepsilon_{s1} \geqslant 454$ (MPa)
S 500 B : $\sigma_{s1} = 433,20 + 727,27.\varepsilon_{s1} \geqslant 466$ (MPa)
S 500 C : $\sigma_{s1} = 432,84 + 895,52.\varepsilon_{s1} \geqslant 493$ (MPa)
$\sigma_{s1} = E_s.\varepsilon_{s1}$
$\leq$
$\mu_{cu} \gtrless 0,225$
$>$
Formule simplifiée
Formule exacte
$z_c = d(1 - 0,6.\mu_{cu})$
$z_c = d\left(1 - \dfrac{\lambda}{2}\alpha_u\right)$
$A_{s1,\,u} = \dfrac{M_{Ed} - M_{Tu}\dfrac{b_{eff} - b_w}{b_{eff}}}{z_c.\sigma_{s1}} + \dfrac{(b_{eff} - b_w)h_f.f_{cu}}{\sigma_{s1}} + A_{s2}\dfrac{\sigma_{s2,\,e}}{\sigma_{s1,\,e}}$
Vérifier : $\begin{cases} A_{s1,\,u} \geq A_{s,\,min} \\ \text{et} \\ A_{s1,\,u} \text{ et } A_{s2} \leq 0,04.A_c \end{cases}$

9.1.1.2. Diagramme σ–ε des aciers à palier horizontal



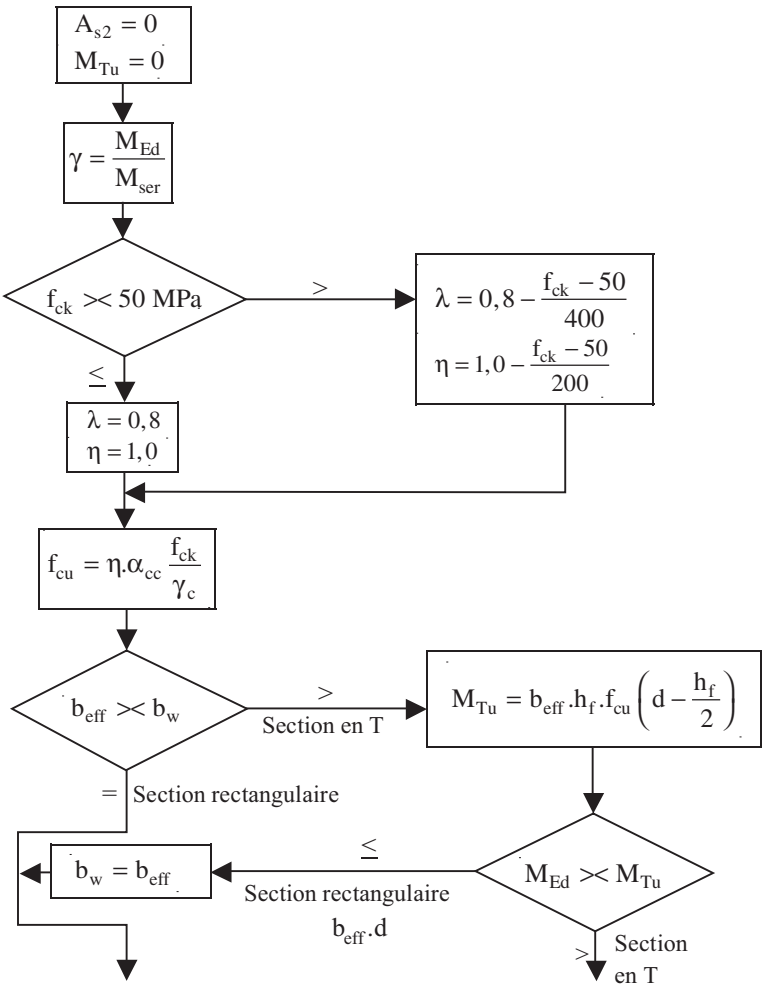
■ Sollicitations :
M_{Ed}, M_{ser}.

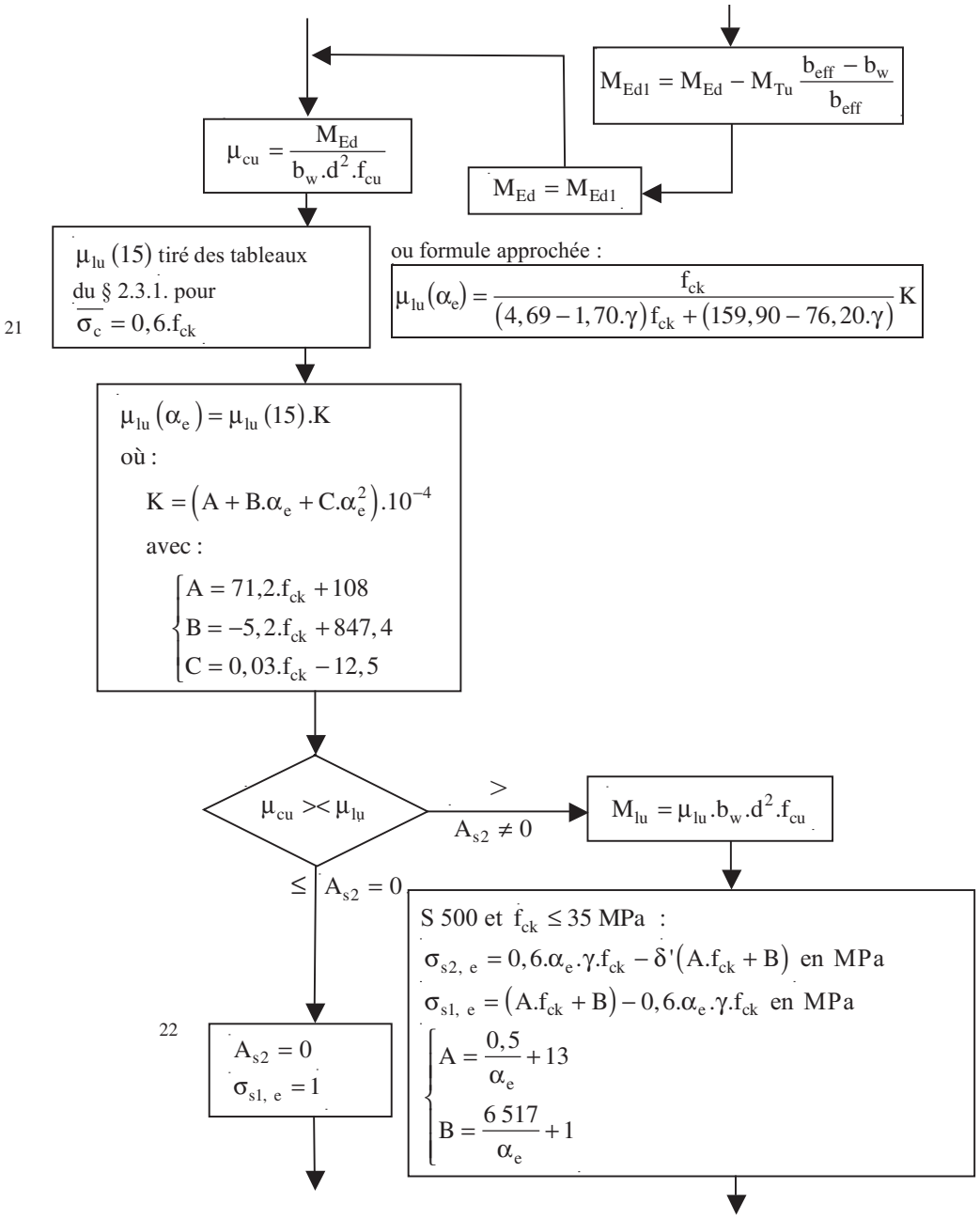
■ Matériaux :
f_{ck} ,

$f_{yd} = \dfrac{f_{yk}}{\gamma_s}$

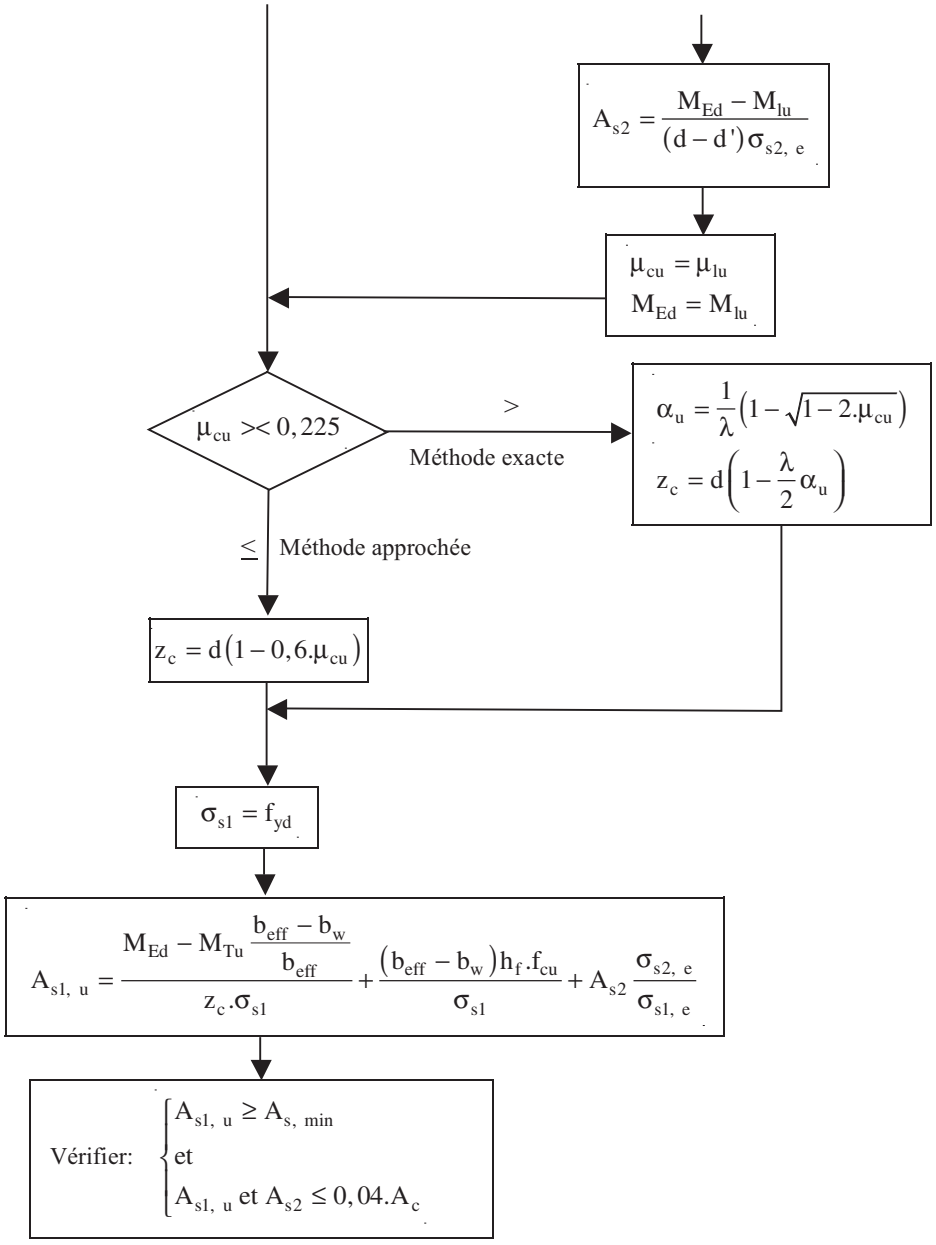
$E_s = 2.10^5$ MPa,

$\alpha_e = \dfrac{E_s}{E_{c,\,eff}}$.





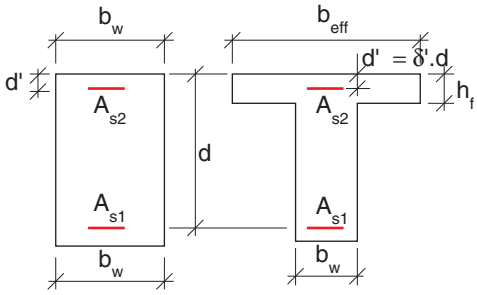
21. Dans le cas des ponts, si α_{cc} est différent de 1, prendre μ_{lu} (15) correspondant à la classe de résistance fictive $\alpha_{cc}.f_{ck}$.



22. $\sigma_{s1,\,e} \neq 0$ pour éviter une division par 0 dans la formule finale donnant $A_{s1,\,u}$.

9.1.2. Cas où la contrainte de compression du béton n'est pas limitée à l'ELS

Classes d'exposition X0, XC et XA.



■ Sollicitations :

M_{Ed} , M_{ser}, .

■ Matériaux :

f_{ck} ,

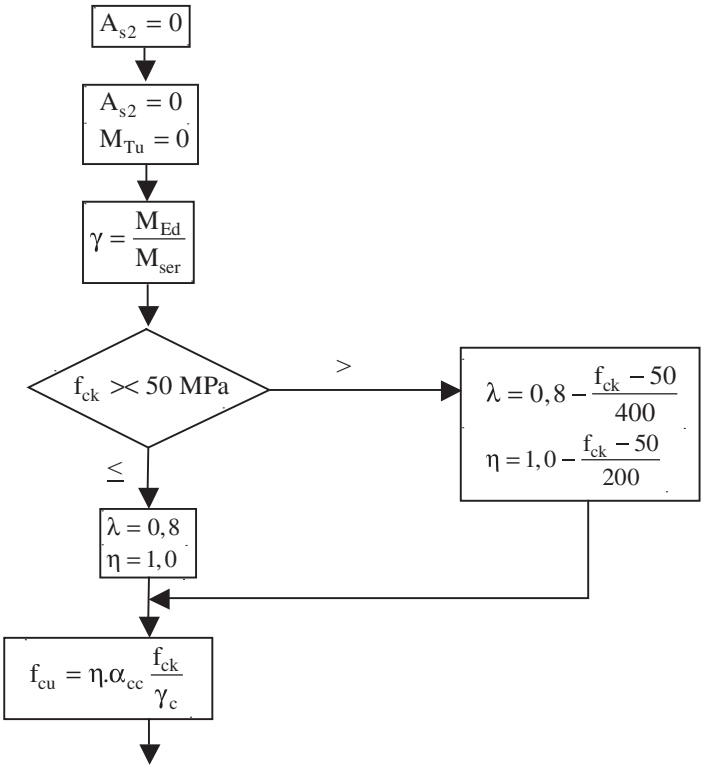
$f_{yd} = \dfrac{f_{yk}}{\gamma_s}$ et classe de ductilité,

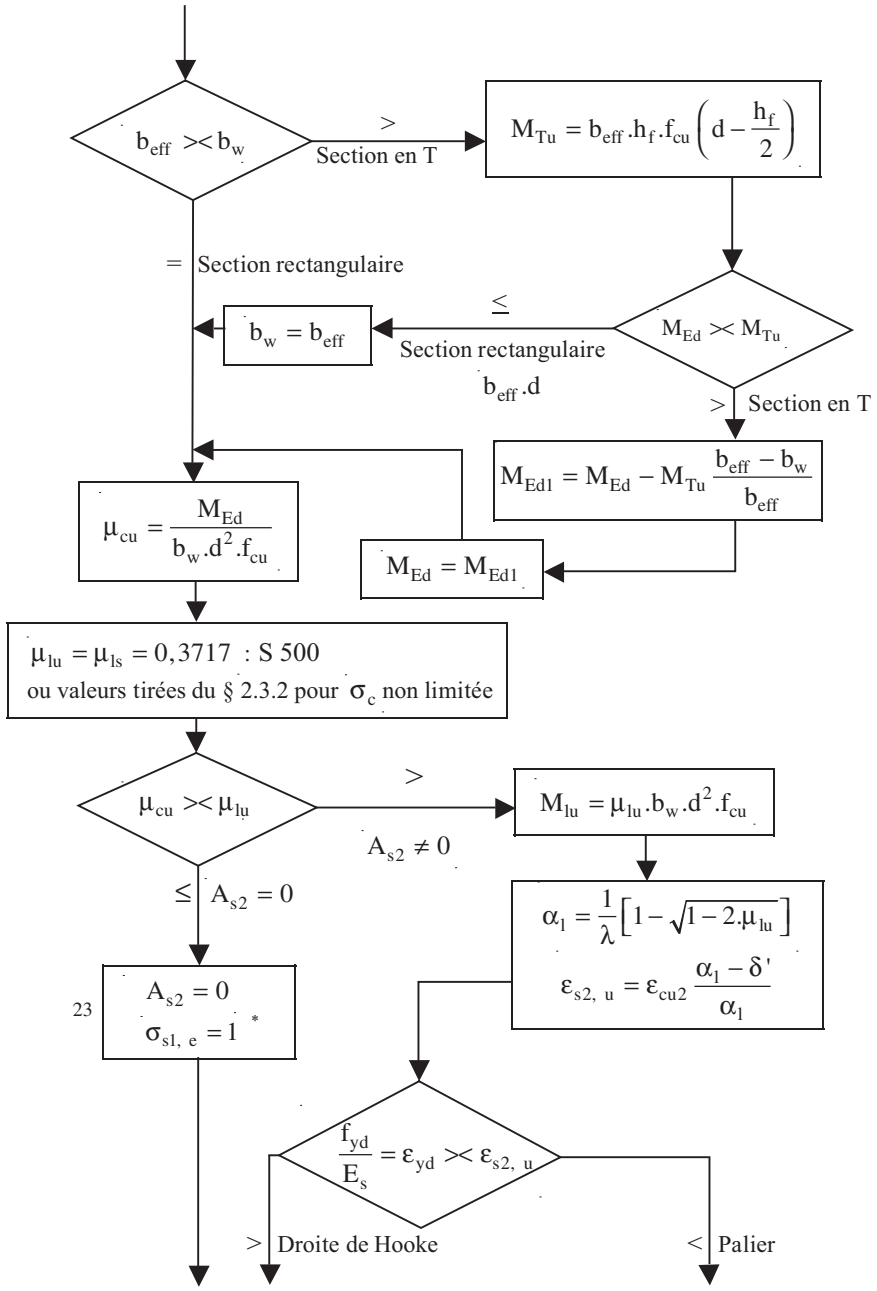
$E_s = 2.10^5$ MPa,

ε_{cu2} ou ε_{cu3} ,

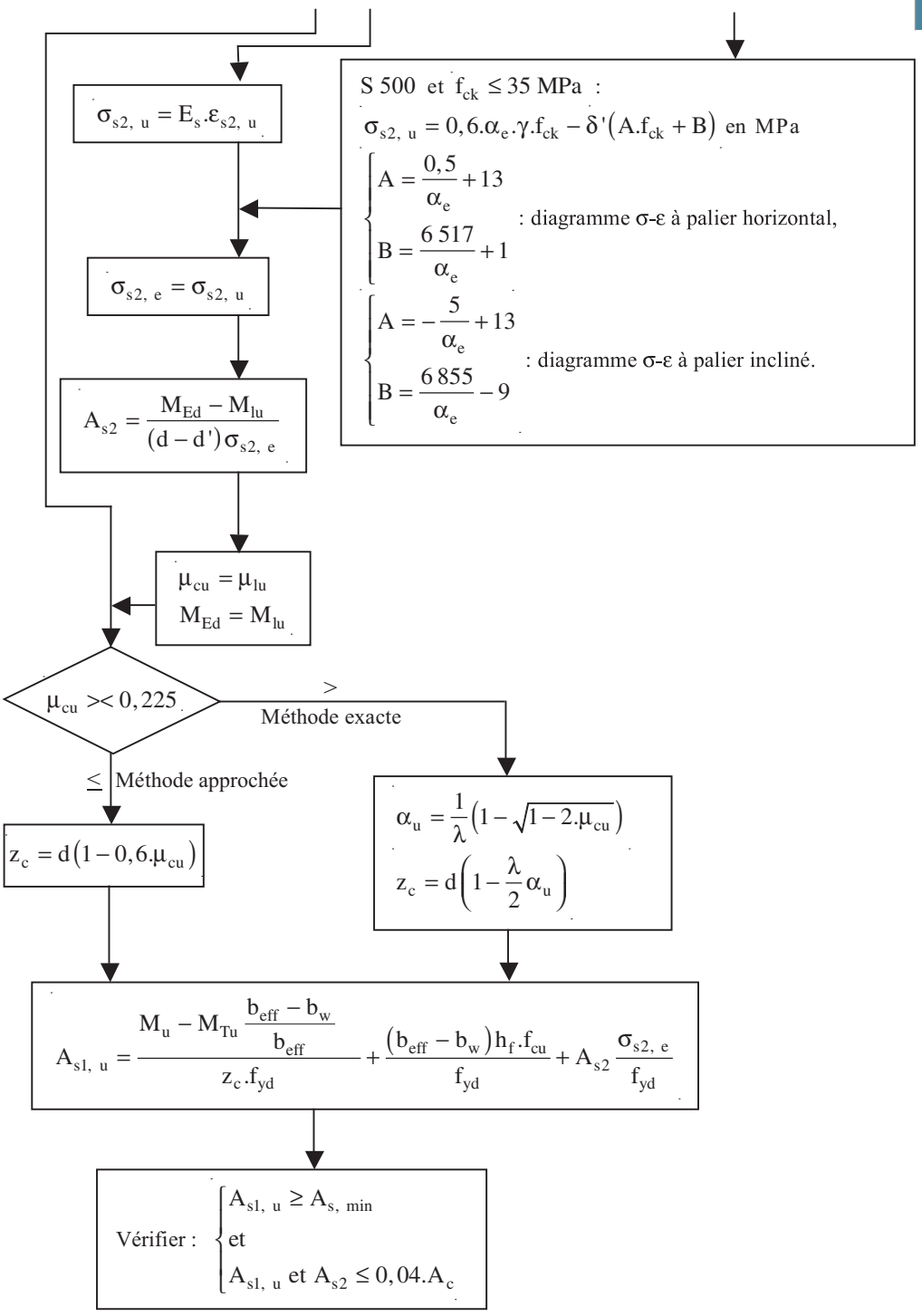
type de diagramme σ–ε des aciers,

$\alpha_e = \dfrac{E_s}{E_{c,\,eff}}$.



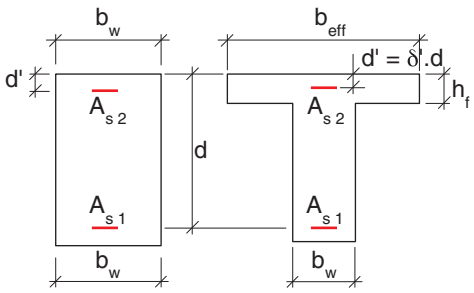


23. : nota : $\sigma_{s1,\,e} \neq 0$ pour éviter une division par 0 dans la formule finale donnant $A_{s1,\,u}$.


$\sigma_{s2,\,u} = E_s.\varepsilon_{s2,\,u}$
S 500 et $f_{ck} \le 35$ MPa :
$\sigma_{s2,\,u} = 0,6.\alpha_e.\gamma.f_{ck} - \delta'\left(A.f_{ck} + B\right)$ en MPa
$A = \frac{0,5}{\alpha_e} + 13$
$B = \frac{6\,517}{\alpha_e} + 1$
: diagramme σ-ε à palier horizontal,
$A = -\frac{5}{\alpha_e} + 13$
$B = \frac{6\,855}{\alpha_e} - 9$
: diagramme σ-ε à palier incliné.
$\sigma_{s2,\,e} = \sigma_{s2,\,u}$
$A_{s2} = \frac{M_{Ed} - M_{lu}}{(d - d')\sigma_{s2,\,e}}$
$\mu_{cu} = \mu_{lu}$
$M_{Ed} = M_{lu}$
$\mu_{cu} >< 0,225$
>
Méthode exacte
≤ Méthode approchée
$z_c = d\left(1 - 0,6.\mu_{cu}\right)$
$\alpha_u = \frac{1}{\lambda}\left(1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{cu}}\right)$
$z_c = d\left(1 - \frac{\lambda}{2}\alpha_u\right)$
$A_{s1,\,u} = \frac{M_u - M_{Tu}\frac{b_{eff} - b_w}{b_{eff}}}{z_c.f_{yd}} + \frac{\left(b_{eff} - b_w\right)h_f.f_{cu}}{f_{yd}} + A_{s2}\frac{\sigma_{s2,\,e}}{f_{yd}}$
Vérifier :
$A_{s1,\,u} \ge A_{s,\,min}$
et
$A_{s1,\,u}$ et $A_{s2} \le 0,04.A_c$

9.2. Dimensionnement des armatures à l'ELS

Organigramme donné à titre indicatif, le dimensionnement à l'ELS n'étant pas prépondérant pour les cas courants ($f_{ck} \leq 50$ MPa et aciers S 500).



■ Sollicitation :

M_{ser} .

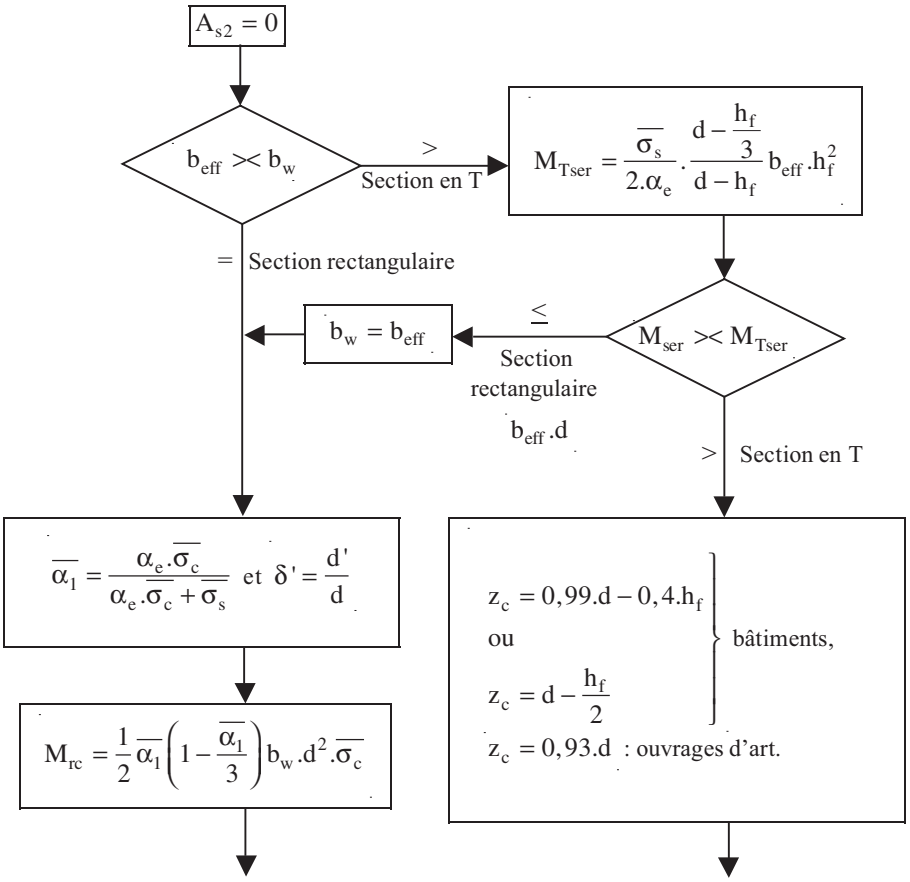
■ Matériaux :

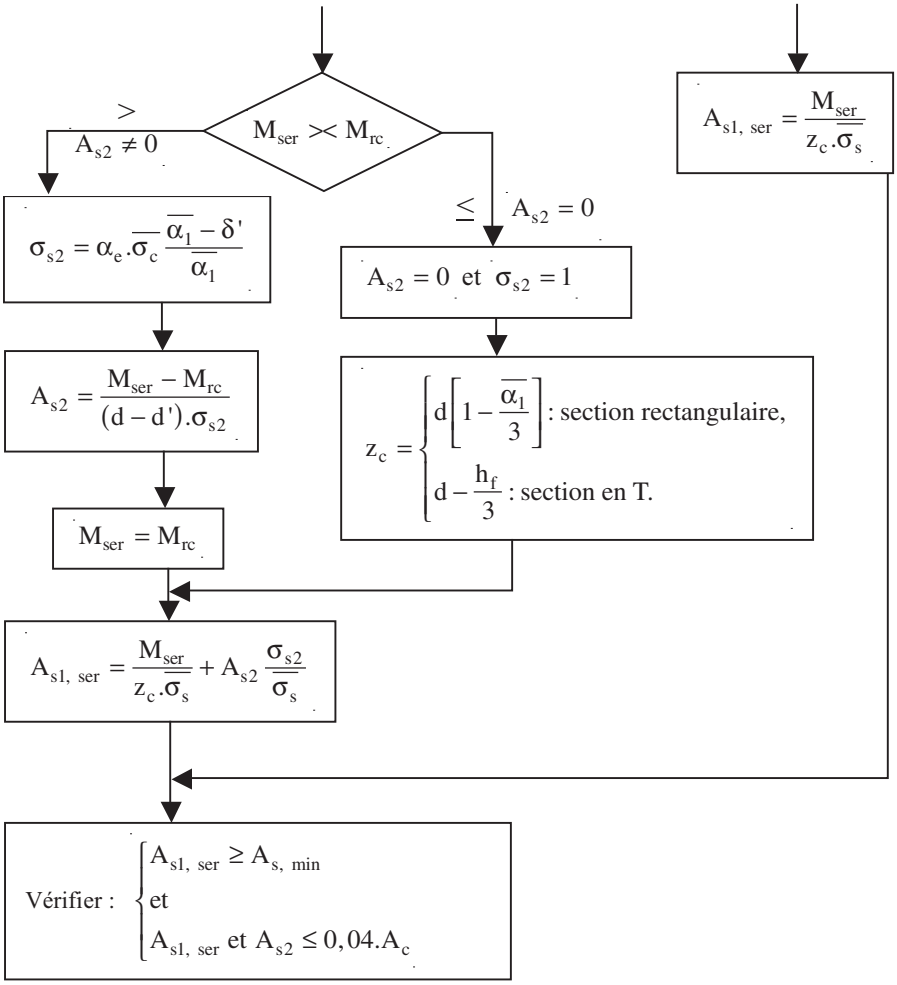
$\overline{\sigma_c}$,

$\overline{\sigma_s}$.

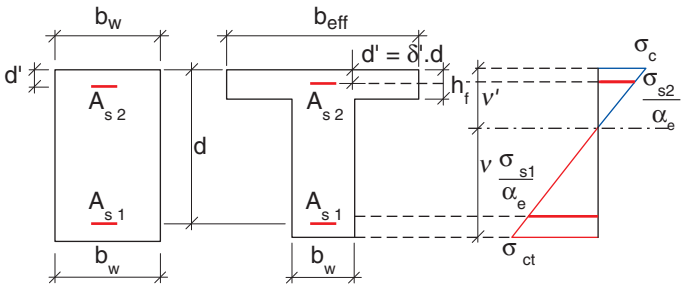
■ Coefficient d'équivalence :

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{c,\,eff}} .$$





9.3. Vérification des contraintes à l'ELS



■ Sollicitation : M_{ser} .

■ Matériaux : $\overline{\sigma_c}$, $\overline{\sigma_s}$, f_{ctm}, $f_{ct,\,eff}$

$\alpha_e = \dfrac{E_s}{E_{c,\,eff}}$.

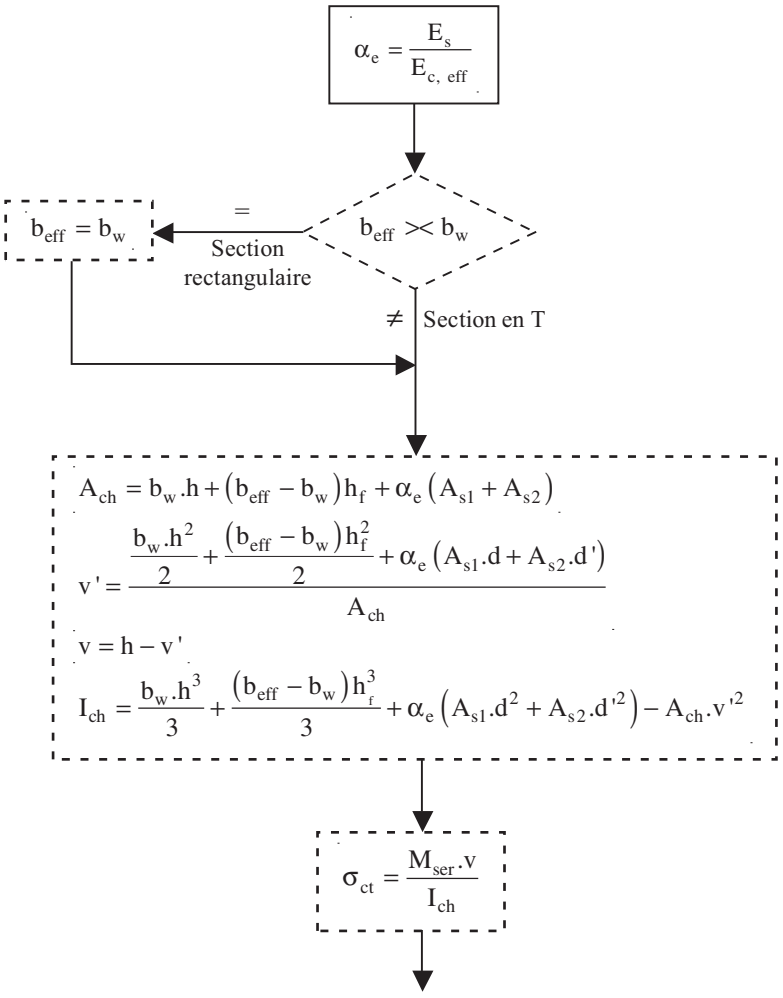
Remarque

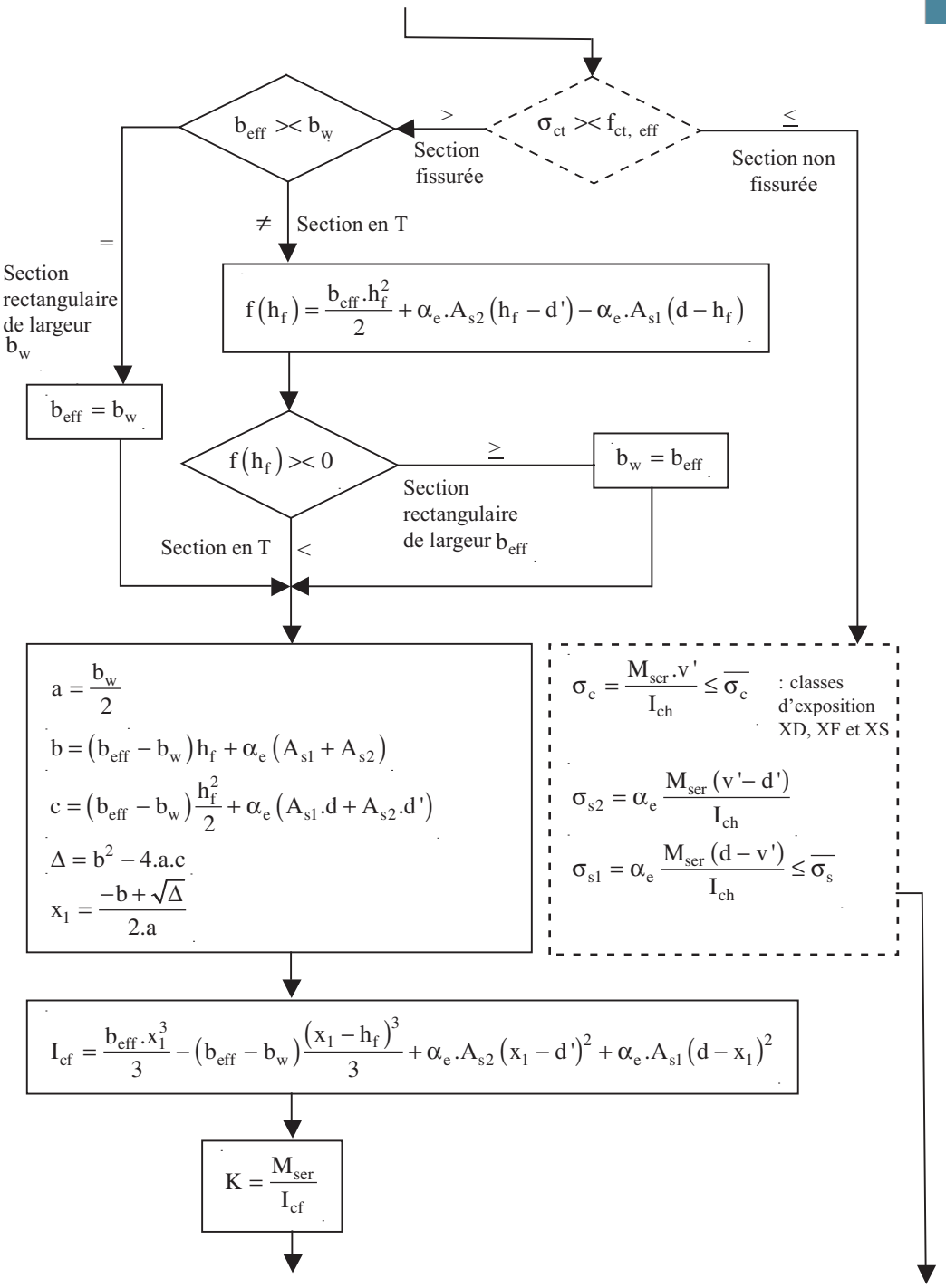
La vérification des contraintes pour la section non fissurée étant toujours assurée, la partie du logigramme en pointillés n'est généralement pas à faire.

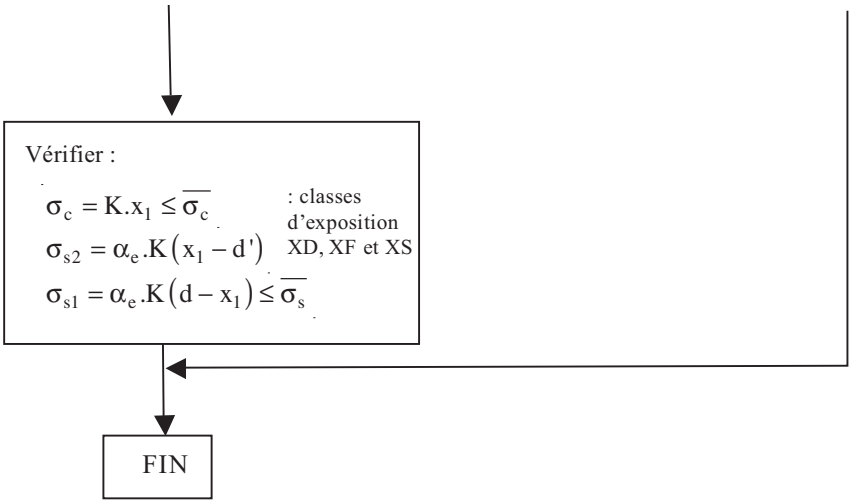
Contraintes limites :

$\overline{\sigma_c} = k_1.f_{ck}$,

$\overline{\sigma_s} = k_3.f_{yk}$.




$b_{eff} \gtrless b_w$
$\sigma_{ct} \gtrless f_{ct,\ eff}$
>
Section fissurée
≤
Section non fissurée
≠
Section en T
=
Section rectangulaire de largeur b_w
$f(h_f) = \frac{b_{eff}.h_f^2}{2} + \alpha_e.A_{s2}(h_f - d') - \alpha_e.A_{s1}(d - h_f)$
$b_{eff} = b_w$
$f(h_f) \gtrless 0$
≥
$b_w = b_{eff}$
Section rectangulaire de largeur b_{eff}
Section en T
<
$a = \frac{b_w}{2}$
$b = (b_{eff} - b_w)h_f + \alpha_e(A_{s1} + A_{s2})$
$c = (b_{eff} - b_w)\frac{h_f^2}{2} + \alpha_e(A_{s1}.d + A_{s2}.d')$
$\Delta = b^2 - 4.a.c$
$x_1 = \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2.a}$
$\sigma_c = \frac{M_{ser}.v'}{I_{ch}} \le \overline{\sigma_c}$
: classes d'exposition XD, XF et XS
$\sigma_{s2} = \alpha_e \frac{M_{ser}(v' - d')}{I_{ch}}$
$\sigma_{s1} = \alpha_e \frac{M_{ser}(d - v')}{I_{ch}} \le \overline{\sigma_s}$
$I_{cf} = \frac{b_{eff}.x_1^3}{3} - (b_{eff} - b_w)\frac{(x_1 - h_f)^3}{3} + \alpha_e.A_{s2}(x_1 - d')^2 + \alpha_e.A_{s1}(d - x_1)^2$
$K = \frac{M_{ser}}{I_{cf}}$

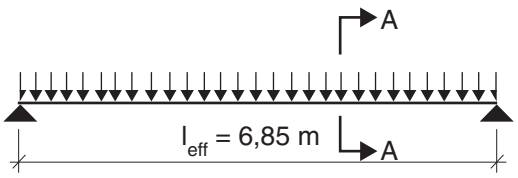


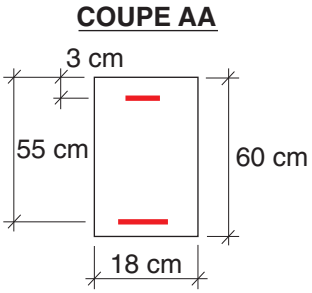
II. APPLICATIONS

Application n° 1 : section rectangulaire sans aciers comprimés – Calcul des armatures à l'ELU et à l'ELS

–Énoncé–

On considère la poutre sur deux appuis simples ci-dessous :





- Actions uniformément réparties :
  - permanentes : g_1 = 15,40 kN/m (hors poids propre) ;
  - variables : q = 9 kN/m ;
  - $\alpha_e = \dfrac{E_s}{E_{c,\,eff}} = 15.$

- Classe d'exposition XD2. Maîtrise de la fissuration non requise.
- Matériaux :
  - béton : $f_{ck} = 25$ MPa, $\varepsilon_{cu2} = \varepsilon_{cu3} = 3,5 / 1\,000$;
  - aciers : S 500 A.

On se propose :
1/ de déterminer le ferraillage de la section médiane de la poutre à l'ELU dans le cas du diagramme σ–ε d'acier à palier incliné ;
2/ de calculer la contrainte de traction maximale du béton de la section supposée non fissurée à l'état limite de service ;
3/ de déterminer le ferraillage de la section médiane de la poutre à l'ELS par compression du béton ;
4/ de vérifier les contraintes à l'ELS en supposant la section fissurée.

–Corrigé–

1. Caractéristiques des matériaux

1.1 Béton

$f_{ck} >< 50$ MPa $\Rightarrow \begin{cases} \lambda, \\ \eta \end{cases}$ $\quad f_{ck} = 25 \text{ MPa} < 50 \text{ MPa} \Rightarrow \begin{cases} \lambda = 0,8 \\ \eta = 1 \end{cases}$

$f_{cu} = \eta.\alpha_{cc} \dfrac{f_{ck}}{\gamma_c}$ $\quad f_{cu} = 1.1 \dfrac{25}{1,5} = 16,7 \text{ MPa}$

$f_{ck} \leq 50$ MPa $\Rightarrow f_{ctm} = 0,3\left[f_{ck}\right]^{2/3}$ $\quad f_{ctm} = 0,3\left[25\right]^{2/3} = 2,56$ MPa

$\overline{\sigma_c} = k_1.f_{ck}$ $\quad \overline{\sigma_c} = 0,6.25 = 15$ MPa

1.2 Aciers

$f_{yd} = \dfrac{f_{yk}}{\gamma_s}$ $\quad f_{yd} = \dfrac{500}{1,15} = 435$ MPa

$\overline{\sigma_s} = k_3.f_{yk}$ $\quad \overline{\sigma_s} = 0,8.500 = 400$ MPa

2. Sollicitations de flexion

2.1 État limite ultime de résistance

- Actions au ml :

ϖ = poids volumique du béton armé $\quad \varpi = 25$ kN/m^3

$g = g_1 + \varpi.b_w.h$ $\quad g = 15,40 + 25.0,18.0,60 = 18,10$ kN/m

$p_u = 1,35.g + 1,5.q$ $\quad p_u = 1,35.18,10 + 1,5.9$

$\quad p_u = 37,94$ kN/m

• Moment fléchissant maximal :

$$M_{Ed} = p_u \frac{l_{eff}^2}{8} \qquad M_{Ed} = 37,94 \frac{6,85^2}{8}$$

$$M_{Ed} = 222,53 \text{ mkN}$$

2.2 État limite de service

• Actions au ml :

$$p_{ser} = g + q \qquad p_{ser} = 18,10 + 9$$

$$p_{ser} = 27,10 \text{ kN/m}$$

• Moment fléchissant maximal :

$$M_{ser} = p_{ser} \frac{l_{eff}^2}{8} \qquad M_{ser} = 27,10 \frac{6,85^2}{8}$$

$$M_{ser} = 158,95 \text{ mkN}$$

2.3 Coefficient γ

$$\gamma = \frac{M_{Ed}}{M_{ser}} \qquad \gamma = \frac{222,53}{158,95} = 1,40$$

3. Calcul des armatures tendues à l'ELU dans le cas du diagramme σ–ε d'acier à palier incliné

$$\mu_{cu} = \frac{M_{Ed}}{b_w.d^2.f_{cu}} \qquad \mu_{cu} = \frac{0,22253}{0,18.0,55^2.16,7} = 0,245$$

$$\Rightarrow \quad \alpha_u = \frac{1}{\lambda}\left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{cu}}\right] \qquad \alpha_u = \frac{1}{0,8}\left[1 - \sqrt{1 - 2.0,245}\right] = 0,357$$

Classe de ductilité et $f_{ck} \Rightarrow \mu_{AB}$ Aciers S 500 A et $f_{ck} = 25$ MPa

$$\Rightarrow \begin{cases} \alpha_{AB} = 0,1346 \\ \mu_{AB} = 0,1019 \end{cases}$$

$\Rightarrow \mu_{cu} >< \mu_{AB} \Rightarrow$ Pivot $\qquad \mu_{cu} = 0,245 > 0,1019 = \mu_{AB} \Rightarrow$ Pivot B

$$\Rightarrow \quad \varepsilon_c = \varepsilon_{cu2} = \varepsilon_{cu3} = \frac{3,5}{1\,000}$$

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_c \frac{1 - \alpha_u}{\alpha_u} \qquad \varepsilon_{s1} = \frac{3,5}{1\,000}.\frac{1 - 0,357}{0,357} = \frac{6,30}{1\,000}$$

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} \qquad \varepsilon_{yd} = \frac{435}{2.10^5} = \frac{2,175}{1\,000}$$

$\varepsilon_{s1} >< \varepsilon_{yd}$ $\quad \varepsilon_{s1} = \dfrac{6,30}{1\,000} > \dfrac{2,175}{1\,000} = \varepsilon_{yd} \quad \Rightarrow$ palier du diagramme σ–ε de l'acier

$\sigma_{s1} = 432,71 + 952,38.\varepsilon_{s1} \not> 454$ (MPa)

$$\sigma_{s1} = 432,71 + 952,38.6,30.10^{-3} = 439 \text{ MPa}$$

$$\Rightarrow \quad z_c = d\left[1 - \frac{\lambda}{2}\alpha_u\right] \qquad z_c = 0,55\left[1 - \frac{0,8}{2}0,357\right] = 0,472 \text{ m}$$

$$\Rightarrow \quad A_{s1,\,u} = \frac{M_{Ed}}{z_c.\sigma_{s1}} \qquad \boxed{A_{s1,\,u} = \frac{0,22253}{0,472.439}10^4 = 10,74 \text{ cm}^2}$$

Section minimale :

Maîtrise de la fissuration non requise $\Rightarrow$

$$f_{ct,\,eff} = f_{ctm,\,fl} = \text{Max}\begin{cases}\left(1,6 - \dfrac{h}{1\,000}\right)f_{ctm} \\ f_{ctm}\end{cases}$$

$$f_{ct,\,eff} = 2,56 \text{ MPa} = \text{Max}\begin{cases}\left(1,6 - \dfrac{600}{1\,000}\right)2,56 = 2,56 \text{ MPa} \\ f_{ctm} = 2,56 \text{ MPa}\end{cases}$$

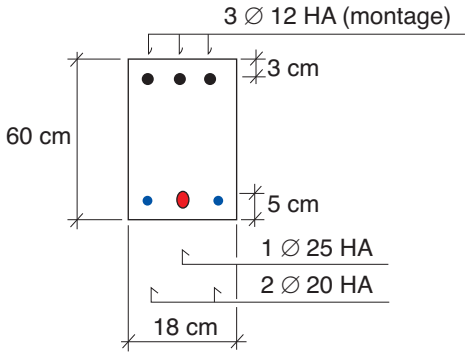
$$A_{s1} >< A_{s,\,min} = \text{Max}\begin{cases}0,26\dfrac{f_{ct,\,eff}}{f_{yk}}b_t.d \\ 0,0013.b_t.d\end{cases}$$

$$A_{s1} = 10,74 \text{ cm}^2 > 1,32 \text{ cm}^2 = A_{s,\,min} = \text{Max}\begin{cases}0,26\dfrac{2,56}{500}18.55 = 1,32 \text{ cm}^2 \\ 0,0013.18.55 = 1,29 \text{ cm}^2\end{cases} \text{ O.K.}$$

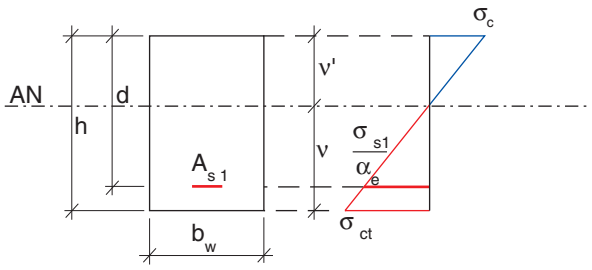
A_{s1} et $A_{s2} >< 0,04.\,A_c$ $\qquad A_{s1} = 10,74 \text{ cm}^2 < 43,2 \text{ cm}^2 = 0,04.18.60$ O.K.

En prenant trois files verticales :

$\boxed{1\,\phi\,25 \text{ HA} + 2\,\phi\,20 \text{ HA} : 4,91 + 2.3,14 = 11,19 \text{ cm}^2}$



4. Vérification des contraintes à l'ELS dans la section non fissurée



4.1 Caractéristiques géométriques de la section non fissurée

Pour la section d'armatures $A_{s1,\,u}$ calculée : $A_{s1} = A_{s1,\,u} = 10,74\ cm^2$
($< 11,19\ cm^2 = A_{s1,\,prov}$ par sécurité).

$$A_{ch} = b_w.h + \alpha_e\left(A_{s1} + A_{s2}\right) \qquad A_{ch} = 0,18.0,60 + 15.10,74.10^{-4} = 0,1241\ m^2$$

$$v' = \frac{\frac{b_w.h^2}{2} + \alpha_e\left(A_{s1}.d + A_{s2}.d'\right)}{A_{ch}}$$

$$v' = \frac{\frac{0,18.0,60^2}{2} + 15.10,74.10^{-4}.0,55}{0,1241} = 0,332\ m$$

$$v = h - v' \qquad v = 0,60 - 0,332 = 0,268\ m$$

$$I_{ch} = \frac{b_w.h^3}{3} + \alpha_e\left(A_{s1}.d^2 + A_{s2}.d'^2\right) - A_{ch}.v'^2$$

$$I_{ch} = \frac{0,18.0,60^3}{3} + 15.10,74.10^{-4}.0,55^2 - 0,1241.0,332^2 = 0,0041545\ m^4$$

4.2 Contrainte de traction du béton en fibre inférieure

$$\sigma_{ct} = \frac{M_{ser}.v}{I_{ch}} \qquad \sigma_{ct} = \frac{158,95.10^{-3}.0,268}{0,0041545} = 10,25\ MPa$$

$\sigma_{ct} >< f_{ct,\,eff}$ (voir § 3, valeur utilisée pour le calcul de $A_{s,\,min}$)

$$\sigma_{ct} = 10,25\ MPa > 2,56\ MPa = f_{ct,\,eff}$$

⇒ La section doit être considérée comme fissurée pour la vérification des contraintes à l'ELS.

Remarque

$A_{s1,\,prov} = 11,19\ cm^2 > 10,74\ cm^2 = A_{s1,\,u}$, d'où la contrainte réelle de traction du béton en fibre inférieure est inférieure à $\sigma_{ct} = 10,25\ MPa$

5. Calcul des armatures tendues à l'ELS par compression du béton

5.1 Armatures

$$\mu_{ser} = \frac{M_{ser}}{b_w.d^2.\overline{\sigma_c}} \qquad \mu_{ser} = \frac{0,15895}{0,18.0,55^2.15} = 0,1946$$

$$\Rightarrow \quad \alpha_1 = 1,5\left(1 - \sqrt{1 - \frac{8}{3}\mu_{ser}}\right) \qquad \alpha_1 = 1,5\left(1 - \sqrt{1 - \frac{8}{3}0,1946}\right) = 0,4596$$

$$\Rightarrow \quad \sigma_{s1} = \alpha_e.\overline{\sigma_c}\,\frac{1-\alpha_1}{\alpha_1} \qquad \sigma_{s1} = 15.15\,\frac{1-0,4596}{0,4596} = 265 \text{ MPa}$$

$$\Rightarrow \quad z_{c1} = d\left(1 - \frac{\alpha_1}{3}\right) \qquad z_{c1} = 0,55\left(1 - \frac{0,4596}{3}\right) = 0,466 \text{ m}$$

$$\Rightarrow \quad A_{s1,\,ser} = \frac{M_{ser}}{z_{c1}.\sigma_{s1}} \qquad \boxed{A_{s1,\,ser} = \frac{0,15895}{0,466265}10^4 = 12,87 \text{ cm}^2}$$

5.2 Remarque

$f_{ck} = 25$ MPa,
S 500 A,
$\gamma = 1,40$,
σ_c limitée (classe XD).

$\Rightarrow \mu_{lu}$ $\mu_{lu} = 0,2252$ (voir § 2.3.1 des rappels théoriques)

$$M_{lu} = \mu_{lu}.b_w.d^2.f_{cu} \qquad M_{lu} = 0,2252.0,18.0,55^2.16,7 = 0,2048 \text{ mMN}$$

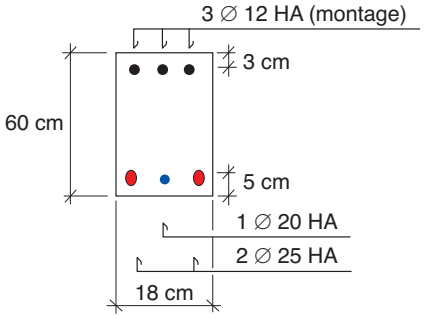
$$M_{Ed} = 0,2225 \text{ mMN} > 0,2048 \text{ mMN} = M_{lu}$$

et l'on a
$A_{s1,\,ser} = 12,87 \text{ cm}^2 > 10,74 \text{ cm}^2 = A_{s1,\,u}$
avec un écart :

$$\frac{A_{s1,\,ser} - A_{s1,\,u}}{A_{s1,\,u}} = \frac{12,87 - 10,74}{10,74}\,10 = 20\,\%$$

Ce qui justifie l'intérêt économique du moment limite ultime.
En prenant trois files verticales :

$$\boxed{2\,\phi\,25 \text{ HA} + 1\,\phi\,20 \text{ HA} : 2.4,91 + 3,14 = 12,96 \text{ cm}^2}$$



6. Vérification des contraintes à l'ELS dans le cas de la section de béton fissurée

6.1 Position de l'axe neutre

Pour la section d'armatures $A_{s1,\ ser}$ calculée : $A_{s1} = A_{s1,\ ser} = 12{,}87\ cm^2$

$$\frac{b_w.x_1^2}{2} + \alpha_e A_{s1}.x_1 - \alpha_e.A_{s1}.d = 0$$

$$\frac{0{,}18.x_1^2}{2} + 15.12{,}87.10^{-4}.x_1 - 15.12{,}87.10^{-4}.0{,}55 = 0$$

$$0{,}09.x_1^2 + 0{,}01931.x_1 - 0{,}01062 = 0$$

$$\Delta = 0{,}01931^2 + 4.0{,}09.0{,}01062 = 0{,}0648^2$$

$$x_1 = \frac{-0{,}01931 + 0{,}0648}{2.0{,}09} = 0{,}253\ m$$

$$\alpha_1 = \frac{0{,}253}{0{,}55} = 0{,}460$$

6.2 Moment d'inertie de la section fissurée

$$I_{cf} = \frac{b_w.x_1^3}{3} + \alpha_e.A_{s1}\left(d - x_1\right)^2$$

$$I_{cf} = \frac{0{,}18.0{,}253^3}{3} + 15.12{,}87.10^{-4}(0{,}55 - 0{,}253)^2 = 0{,}002675\ m^4$$

6.3 Contraintes

$$K = \frac{M_{ser}}{I_{cf}} \qquad K = \frac{0{,}15895}{0{,}002675} = 59{,}42\ MN/m^3$$

Classe d'exposition XD2 $\Rightarrow$ $\sigma_c = K.x_1 >< \overline{\sigma_c}$

$$\sigma_c = 59{,}42.0{,}253 = 15{,}03\ MPA \approx \overline{\sigma_c}\ O.K.$$

$$\sigma_{s1} = \alpha_e.K\left(d - x_1\right) >< \overline{\sigma_s}$$

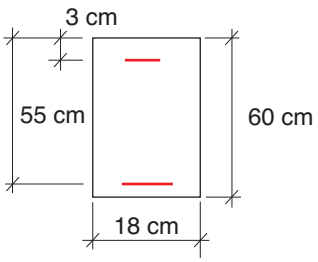
$$\boxed{\sigma_{s1} = 15.59{,}42\ (0{,}55 - 0{,}253) = 263\ MPa < 400\ MPa\ O.K.}$$

$$\frac{\sigma_{s1}}{f_{yk}} \qquad \frac{\sigma_{s1}}{f_{yk}} = \frac{265}{500} = 0{,}53 < 0{,}8 = k_3$$

Application n° 2 : section rectangulaire sans aciers comprimés – Notion de moment limite ultime

–Énoncé–

On considère la section rectangulaire définie ci-contre.



Sollicitations :

$M_{Ed} = 0,2048$ mkN,

$M_{ser} = 0,1463$ mkN,

$\alpha_e = \dfrac{E_s}{E_{c,\,eff}} = 15.$

Classe d'exposition XD2. Maîtrise de la fissuration non requise.

Matériaux :

- béton : $f_{ck} = 25$ MPa, $\varepsilon_{cu2} = \varepsilon_{cu3} = 3,5 / 1000$;
- aciers : S 500 A.

On se propose :

1/ de déterminer le ferraillage de cette section à l'ELU dans le cas du diagramme σ–ε d'acier à palier incliné ;
2/ de déterminer le ferraillage de cette section à l'ELU dans le cas du diagramme σ–ε d'acier à palier horizontal ;
3/ de déterminer le ferraillage de cette section à l'ELS par compression du béton ;
4/ de vérifier les contraintes à l'ELS.

–Corrigé–

1. Caractéristiques des matériaux

1.1 Béton

$f_{ck} >< 50$ MPa $\Rightarrow \begin{cases} \lambda, \\ \eta \end{cases}$ $\qquad$ $f_{ck} = 25$ MPa < 50 MPa $\Rightarrow \begin{cases} \lambda = 0,8 \\ \eta = 1 \end{cases}$

$f_{cu} = \eta.\alpha_{cc} \dfrac{f_{ck}}{\gamma_c}$ $\qquad$ $f_{cu} = 1.1 \dfrac{25}{1,5} = 16,7$ MPa

$f_{ck} \leq 50$ MPa $\Rightarrow$ $f_{ctm} = 0,3\left[f_{ck}\right]^{2/3}$ $\qquad$ $f_{ctm} = 0,3\left[25\right]^{2/3} = 2,56$ MPa

$\overline{\sigma_c} = k_1.f_{ck}$ $\overline{\sigma_c} = 0,6.25 = 15$ MPa

1.2 Aciers

$f_{yd} = \dfrac{f_{yk}}{\gamma_s}$ $f_{yd} = \dfrac{500}{1,15} = 435$ MPa

$\overline{\sigma_s} = k_3.f_{yk}$ $\overline{\sigma_s} = 0,8.500 = 400$ MPa

2. Sollicitations de flexion

2.1 Moments fléchissants

M_{Ed} $M_{Ed} = 0,2048$ mkN

M_{ser} $M_{ser} = 0,1463$ mkN

2.2 Coefficient γ

$\gamma = \dfrac{M_{Ed}}{M_{ser}}$ $\gamma = \dfrac{0,2048}{0,1463} = 1,40$

3. Calcul des armatures tendues à l'ELU dans le cas du diagramme σ–ε à palier incliné

$\mu_{cu} = \dfrac{M_{Ed}}{b_w.d^2.f_{cu}}$ $\mu_{cu} = \dfrac{0,2048}{0,18.0,55^2.16,7} = 0,2252$

$\Rightarrow \quad \alpha_u = \dfrac{1}{\lambda}\left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{cu}}\right]$ $\alpha_u = \dfrac{1}{0,8}\left[1 - \sqrt{1 - 2.0,2252}\right] = 0,323$

Classe de ductilité et $f_{ck} \quad \Rightarrow \quad \mu_{AB}$ Aciers S 500 A et $f_{ck} = 25$ MPa

$\Rightarrow \begin{cases} \alpha_{AB} = 0,1346 \\ \mu_{AB} = 0,1019 \end{cases}$

$\Rightarrow \quad \mu_{cu} >< \mu_{AB} \quad \Rightarrow$ Pivot $\mu_{cu} = 0,2252 > 0,1019 = \mu_{AB} \quad \Rightarrow$ Pivot B

$\Rightarrow \quad \varepsilon_c = \varepsilon_{cu2} = \varepsilon_{cu3} = \dfrac{3,5}{1\,000}$

$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_c \dfrac{1 - \alpha_u}{\alpha_u}$ $\varepsilon_{s1} = \dfrac{3,5}{1\,000}.\dfrac{1 - 0,323}{0,323} = \dfrac{7,336}{1\,000}$

$\varepsilon_{yd} = \dfrac{f_{yd}}{E_s}$ $\varepsilon_{yd} = \dfrac{435}{2.10^5} = \dfrac{2,175}{1\,000}$

$\varepsilon_{s1} >< \varepsilon_{yd}$ $\qquad \varepsilon_{s1} = \dfrac{7,336}{1\,000} > \dfrac{2,175}{1\,000} = \varepsilon_{yd} \Rightarrow$ palier du diagramme $\sigma-\varepsilon$ de l'acier

$\sigma_{s1} = 432,71 + 952,38.\varepsilon_{s1} \not> 454$ (MPa)

$$\sigma_{s1} = 432,71 + 952,38.7,336.10^{-3} = 440 \text{ MPa}$$

$\Rightarrow \quad z_c = d\left[1 - \dfrac{\lambda}{2}\alpha_u\right]$ $\qquad z_c = 0,55\left[1 - \dfrac{0,8}{2}0,323\right] = 0,479$ m

$\Rightarrow \quad A_{s1,\,u} = \dfrac{M_{Ed}}{z_c.\sigma_{s1}}$ $\qquad \boxed{A_{s1,\,u} = \dfrac{0,2048}{0,479.440}10^4 = 9,72 \text{ cm}^2}$

Section minimale d'armatures (maîtrise de la fissuration non requise) :

Maîtrise de la fissuration non requise $\Rightarrow \quad f_{ct,\,eff} = f_{ctm,\,fl} = \text{Max}\begin{cases}\left(1,6 - \dfrac{h}{1\,000}\right)f_{ctm}\\ f_{ctm}\end{cases}$

$$f_{ct,\,eff} = 2,56 \text{ MPa} = \text{Max}\begin{cases}\left(1,6 - \dfrac{600}{1\,000}\right)2,56 = 2,56 \text{ MPa}\\ f_{ctm} = 2,56 \text{ MPa}\end{cases}$$

$$A_{s1} >< A_{s,\,min} = \text{Max}\begin{cases}0,26\dfrac{f_{ct,\,eff}}{f_{yk}}b_t.d\\ 0,0013.b_t.d\end{cases}$$

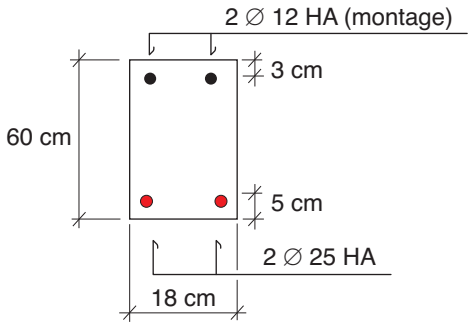
$$A_{s,\,min} = 1,32 \text{ cm}^2 = \text{Max}\begin{cases}0,26\dfrac{2,56}{500}18.55 = 1,32 \text{ cm}^2\\ 0,0013.18.55 = 1,29 \text{ cm}^2\end{cases}$$

$\boxed{A_{s1,\,u} = 9,72 \text{ cm}^2 > 1,32 \text{ cm}^2 = A_{s,\,min}}$ O.K.

A_{s1} et $A_{s2} >< 0,04.A_c$ $\quad A_{s1} = 9,72 \text{ cm}^2 < 43,2 \text{ cm}^2 = 0,04.18.60$ O.K.

En prenant deux files verticales :

$\boxed{2\,\phi\,25 \text{ HA} : 2.4,91 = 9,82 \text{ cm}^2}$



4. Calcul des armatures tendues à l'ELU dans le cas du diagramme σ–ε à palier horizontal

$$\mu_{cu} = \frac{M_{Ed}}{b_w.d^2.f_{cu}} \qquad \mu_{cu} = \frac{0,2048}{0,18.0,55^2.16,7} = 0,2252$$

$$\Rightarrow \quad \alpha_u = \frac{1}{\lambda}\left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{cu}}\right] \qquad \alpha_u = \frac{1}{0,8}\left[1 - \sqrt{1 - 2.0,2252}\right] = 0,323$$

Diagramme σ–ε à palier horizontal $\Rightarrow \begin{cases} \alpha_{AB} = 0 \\ \mu_{AB} = 0 \end{cases}$

$\Rightarrow \quad \mu_{cu} >< \mu_{AB} \quad \Rightarrow$ Pivot $\qquad \mu_{cu} = 0,2252 > 0 = \mu_{AB} \quad \Rightarrow$ Pivot B

$$\Rightarrow \quad \varepsilon_c = \varepsilon_{cu2} = \varepsilon_{cu3} = \frac{3,5}{1\,000}$$

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_c \frac{1 - \alpha_u}{\alpha_u} \qquad \varepsilon_{s1} = \frac{3,5}{1\,000}.\frac{1 - 0,323}{0,323} = \frac{7,336}{1\,000}$$

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} \qquad \varepsilon_{yd} = \frac{435}{2.10^5} = \frac{2,175}{1\,000}$$

$\varepsilon_{s1} >< \varepsilon_{yd}$ $\qquad \varepsilon_{s1} = \dfrac{7,336}{1\,000} > \dfrac{2,175}{1\,000} = \varepsilon_{yd} \quad \Rightarrow$ palier du diagramme σ–ε de l'acier

$\sigma_{s1} = f_{yd}$ $\qquad \sigma_{s1} = 435$ MPa

$$\Rightarrow \quad z_c = d\left[1 - \frac{\lambda}{2}\alpha_u\right] \qquad z_c = 0,55\left[1 - \frac{0,8}{2}0,323\right] = 0,479 \text{ m}$$

$$\Rightarrow \quad A_{s1,\,u} = \frac{M_{Ed}}{z_c.\sigma_{s1}} \qquad \boxed{A_{s1,\,u} = \frac{0,2048}{0,479.435}10^4 = 9,82 \text{ cm}^2}$$

Section minimale d'armatures :

(voir § 3) $\boxed{A_{s1,\ u} = 9{,}82\ cm^2 > 1{,}32\ cm^2 = A_{s,\ min}}$ O.K.

En prenant deux files verticales :

$\boxed{2\ \phi 25\ HA : 2.4{,}91 = 9{,}82\ cm^2}$

Remarque

L'écart avec l'utilisation du diagramme σ–ε à palier incliné vaut :

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{9{,}82 - 9{,}72}{9{,}72} 10^2 = 1{,}0\ \%$$

5. Calcul des armatures tendues à l'ELS par compression du béton

$$\mu_{ser} = \frac{M_{ser}}{b_w . d^2 . \overline{\sigma_c}} \qquad \mu_{ser} = \frac{0{,}1463}{0{,}18.0{,}55^2.15} = 0{,}1791$$

$$\Rightarrow \quad \alpha_1 = 1{,}5\left(1 - \sqrt{1 - \frac{8}{3}\mu_{ser}}\right) \qquad \alpha_1 = 1{,}5\left(1 - \sqrt{1 - \frac{8}{3}0{,}1791}\right) = 0{,}4158$$

$$\Rightarrow \quad \sigma_{s1} = \alpha_e . \overline{\sigma_c} \frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1} \qquad \sigma_{s1} = 15.15 \frac{1 - 0{,}4158}{0{,}4158} = 316\ MPa$$

$$\Rightarrow \quad z_{c1} = d\left(1 - \frac{\alpha_1}{3}\right) \qquad z_{c1} = 0{,}55\left(1 - \frac{0{,}4158}{3}\right) = 0{,}474\ m$$

$$\Rightarrow \quad A_{s1,\ ser} = \frac{M_{ser}}{z_{c1} . \sigma_{s1}} \qquad \boxed{A_{s1,\ ser} = \frac{0{,}1463}{0{,}474.316} 10^4 = 9{,}77\ cm^2}$$

Remarque

Diagramme σ–ε à palier incliné : $A_{s1,\ u} = 9{,}72\ cm^2$

Diagramme σ–ε à palier horizontal : $A_{s1,\ u} = 9{,}82\ cm^2$

ELS par compression du béton : $A_{s1,\ ser} = 9{,}77\ cm^2$

$f_{ck} = 25$ MPa
S 500 A
$\gamma = 1{,}40$
σ_c limitée (classe XD)
$\Rightarrow \mu_{pu}(15)$

$\mu_{pu}(15) = 0{,}2252$ (voir tableau du § 2.3.1 des rappels théoriques)

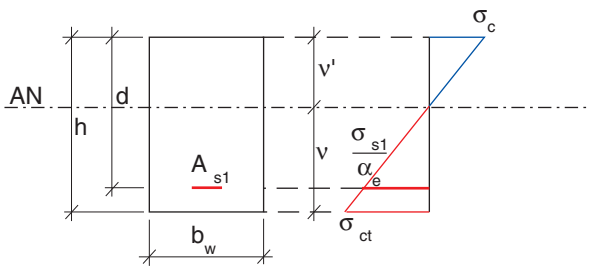
$\mu_{cu} > < \mu_{pu}$

$\alpha_e = 15$ et $\mu_{cu} = 0{,}2252 = \mu_{cu}$

Ce qui confirme bien que : lorsque $A_{s1,\ ser} \approx A_{s1,\ u}$, la section équilibre $M_{Ed} = M_{lu}$

6. Vérification des contraintes à l'ELS

6.1 Contraintes dans la section non fissurée



Nous prendrons en compte la section d'aciers déterminée par le calcul dans le cas du diagramme σ–ε à palier incliné. Il est évident que :

- pour la section d'armatures réelle ;
- ou pour la section calculée à partir du diagramme σ–ε à palier horizontal ;

qui lui sont supérieures, les contraintes trouvées seront inférieures à celles déterminées ci-après.

6.1.1 Caractéristiques géométriques de la section non fissurée

Pour la section d'armatures A_{s1u} calculée : $A_{s1} = A_{s1,\,u} = 9{,}72\ \text{cm}^2$

$$A_{ch} = b_w.h + \alpha_e\left(A_{s1} + A_{s2}\right) \qquad A_{ch} = 0{,}18.0{,}60 + 15.9{,}72.10^{-4} = 0{,}1226\ \text{m}^2$$

$$v' = \frac{\frac{b_w.h^2}{2} + \alpha_e\left(A_{s1}.d + A_{s2}.d'\right)}{A_{ch}}$$

$$v' = \frac{\frac{0{,}18.0{,}60^2}{2} + 15.9{,}72.10^{-4}.0{,}55}{0{,}1226} = 0{,}330\ \text{m}$$

$$v = h - v' \qquad v = 0{,}60 - 0{,}330 = 0{,}27\ \text{m}$$

$$I_{ch} = \frac{b_w.h^3}{3} + \alpha_e\left(A_{s1}.d^2 + A_{s2}.d'^2\right) - A_{ch}.v'^2$$

$$I_{ch} = \frac{0{,}18.0{,}60^3}{3} + 15.9{,}72.10^{-4}.0{,}55^2 - 0{,}1226.0{,}330^2 = 0{,}0040193\ \text{m}^4$$

6.1.2 Contrainte de traction du béton en fibre inférieure

$$\sigma_{ct} = \frac{M_{ser}.v}{I_{ch}} \qquad \sigma_{ct} = \frac{0{,}1463.0{,}27}{0{,}0040193} = 9{,}83\ \text{MPa}$$

$\sigma_{ct} >< f_{ct,\ eff}$ (voir § 3, valeur utilisée pour le calcul de $A_{s,\ min}$)

$$\sigma_{ct} = 9,83 \text{ MPa} > 2,56 \text{ MPa} = f_{ct,\ eff}$$

$\Rightarrow$ La section doit être considérée comme fissurée pour la vérification des contraintes à l'ELS.

6.2 Contraintes à l'ELS dans le cas de la section de béton fissurée

6.2.1 Position de l'axe neutre

$$\frac{b_w.x_1^2}{2} + \alpha_e A_{s1}.x_1 - \alpha_e.A_{s1}.d = 0$$

$$\frac{0,18.x_1^2}{2} + 15.9,72.10^{-4}.x_1 - 15.9,72.10^{-4}.0,55 = 0$$

$$0,09.x_1^2 + 0,01458.x_1 - 0,00802 = 0$$

$$\Delta = 0,01458^2 + 4.0,09.0,00802 = 0,0557^2$$

$$x_1 = \frac{-0,01458 + 0,0557}{2.0,09} = 0,228 \text{ m}$$

$$\alpha_1 = \frac{0,228}{0,55} = 0,415$$

6.2.2 Moment d'inertie de la section fissurée

$$I_{cf} = \frac{b_w.x_1^3}{3} + \alpha_e.A_{s1}\left(d - x_1\right)^2$$

$$I_{cf} = \frac{0,18.0,228^3}{3} + 15.9,72.10^{-4}\left(0,55 - 0,228\right)^2 = 0,002223 \text{ m}^4$$

6.2.3 Contraintes

$$K = \frac{M_{ser}}{I_{cf}} \qquad K = \frac{0,1463}{0,002223} = 65,81 \text{ MN/m}^3$$

Classe d'exposition XD2 $\Rightarrow$ $\sigma_c = K.x_1 >< \overline{\sigma_c}$

$$\boxed{\sigma_c = 65,81.0,228 = 15,00 \text{ MPa} = \overline{\sigma_c} \text{ O.K.}}$$

$\sigma_{s1} = \alpha_e.K\left(d - x_1\right) >< \overline{\sigma_s}$

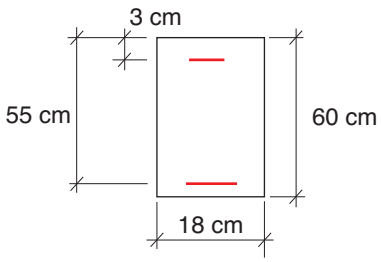
$$\boxed{\sigma_{s1} = 15.65,81(0,55 - 0,228) = 318 \text{ MPa} < 400 \text{ MPa O.K.}}$$

$\frac{\sigma_{s1}}{f_{yk}}$ $\qquad$ $\frac{\sigma_{s1}}{f_{yk}} = \frac{318}{500} = 0,636 < 0,8 = k_3$

Application n° 3 : section rectangulaire sans aciers comprimés – Vérification des contraintes à l'ELS

–Énoncé–

On considère la section rectangulaire définie ci-contre.



Sollicitations :

$M_{Ed} = 0,04356$ mkN,

$M_{ser} = 0,03227$ mkN,

$\alpha_e = \dfrac{E_s}{E_{c,\,eff}} = 15.$

Classe d'exposition XD2. Maîtrise de la fissuration non requise.

Matériaux :

- béton : $f_{ck} = 30$ MPa, $\varepsilon_{cu2} = \varepsilon_{cu3} = 3,5 / 1\,000$,
- aciers : S 500 C.

On se propose :

1/ de déterminer le ferraillage de cette section à l'ELU dans le cas du diagramme σ–ε d'acier à palier incliné ;
2/ de déterminer le ferraillage de cette section à l'ELS par compression du béton ;
3/ de vérifier les contraintes à l'ELS.

–Corrigé–

1. Caractéristiques des matériaux

1.1 Béton

$f_{ck} >< 50$ MPa $\Rightarrow \begin{cases} \lambda, \\ \eta \end{cases}$ $\quad f_{ck} = 30$ MPa < 50 MPa $\Rightarrow \begin{cases} \lambda = 0,8 \\ \eta = 1 \end{cases}$

$f_{cu} = \eta.\alpha_{cc} \dfrac{f_{ck}}{\gamma_c}$ $\quad f_{cu} = 1.1 \dfrac{30}{1,5} = 20$ MPa

$f_{ck} \leq 50$ MPa $\Rightarrow f_{ctm} = 0,3\left[f_{ck}\right]^{2/3}$ $\quad f_{ctm} = 0,3\left[30\right]^{2/3} = 2,896$ MPa

$\overline{\sigma_c} = k_1.f_{ck}$ $\quad$ $\overline{\sigma_c} = 0,6.30 = 18$ MPa

1.2 Aciers

$f_{yd} = \dfrac{f_{yk}}{\gamma_s}$ $\quad$ $f_{yd} = \dfrac{500}{1,15} = 435$ MPa

$\overline{\sigma_s} = k_3.f_{yk}$ $\quad$ $\overline{\sigma_s} = 0,8.500 = 400$ MPa

2. Sollicitations de flexion

2.1 Moments fléchissants

M_{Ed} $\quad$ $M_{Ed} = 0,04356$ mMN

M_{ser} $\quad$ $M_{ser} = 0,03227$ mMN

2.2 Coefficient γ

$\gamma = \dfrac{M_{Ed}}{M_{ser}}$ $\quad$ $\gamma = \dfrac{0,04356}{0,03227} = 1,35$

3. Calcul des armatures tendues à l'ELU dans le cas du diagramme σ–ε à palier incliné

$\mu_{cu} = \dfrac{M_{Ed}}{b_w.d^2.f_{cu}}$ $\quad$ $\mu_{cu} = \dfrac{0,04356}{0,18.0,55^2.20} = 0,040$

$\Rightarrow \quad \alpha_u = \dfrac{1}{\lambda}\left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{cu}}\right]$ $\quad$ $\alpha_u = \dfrac{1}{0,8}\left[1 - \sqrt{1 - 2.0,040}\right] = 0,051$

Classe de ductilité et $f_{ck} \quad \Rightarrow \quad \mu_{AB}$ $\quad$ Aciers S 500 C et $f_{ck} = 30$ MPa

$$\Rightarrow \begin{cases} \alpha_{AB} = 0,0493 \\ \mu_{AB} = 0,0387 \end{cases}$$

$\Rightarrow \quad \mu_{cu} >< \mu_{AB} \quad \Rightarrow$ Pivot $\quad$ $\mu_{cu} = 0,040 > 0,0387 = \mu_{AB} \quad \Rightarrow$ Pivot B

$\Rightarrow \quad \varepsilon_c = \varepsilon_{cu2} = \varepsilon_{cu3} = \dfrac{3,5}{1\,000}$

$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_c \dfrac{1 - \alpha_u}{\alpha_u}$ $\quad$ $\varepsilon_{s1} = \dfrac{3,5}{1\,000}.\dfrac{1 - 0,051}{0,051} = \dfrac{65,13}{1\,000}$

$\varepsilon_{yd} = \dfrac{f_{yd}}{E_s}$ $\quad$ $\varepsilon_{yd} = \dfrac{435}{2.10^5} = \dfrac{2,175}{1\,000}$

$\varepsilon_{s1} >< \varepsilon_{yd}$ $\qquad \varepsilon_{s1} = \dfrac{65,13}{1\,000} > \dfrac{2,175}{1\,000} = \varepsilon_{yd} \Rightarrow$ palier du diagramme σ–ε de l'acier

$\sigma_{s1} = 432,84 + 895,52.\varepsilon_{s1} \not> 493$ (MPa)

$$\sigma_{s1} = 432,84 + 895,52.65,13.10^{-3} = 491 \text{ MPa}$$

$\Rightarrow \quad z_c = d\left[1 - \dfrac{\lambda}{2}\alpha_u\right]$ $\qquad z_c = 0,55\left[1 - \dfrac{0,8}{2}0,051\right] = 0,539$ m

$\Rightarrow \quad A_{s1,\,u} = \dfrac{M_{Ed}}{z_c.\sigma_{s1}}$ $\qquad \boxed{A_{s1,\,u} = \dfrac{0,04356}{0,539.491}10^4 = 1,65 \text{ cm}^2}$

Section minimale d'armatures (maîtrise de la fissuration non requise) :

Maîtrise de la fissuration non requise $\Rightarrow \quad f_{ct,\,eff} = f_{ctm,\,fl} = \text{Max}\left\{\begin{array}{l}\left(1,6 - \dfrac{h}{1\,000}\right)f_{ctm} \\ f_{ctm}\end{array}\right.$

$$f_{ct,\,eff} = 2,896 \text{ MPa} = \text{Max}\left\{\begin{array}{l}\left(1,6 - \dfrac{600}{1\,000}\right)2,896 = 2896 \text{ MPa} \\ f_{ctm} = 2,896 \text{ MPa}\end{array}\right.$$

$$A_{s1} >< A_{s,\,min} = \text{Max}\left\{\begin{array}{l}0,26\dfrac{f_{ct,\,eff}}{f_{yk}}b_t.d \\ 0,0013.b_t.d\end{array}\right.$$

$$A_{s,\,min} = 1,49 \text{ cm}^2 = \text{Max}\left\{\begin{array}{l}0,26\dfrac{2,896}{500}18.55 = 1,49 \text{ cm}^2 \\ 0,0013.18.55 = 1,29 \text{ cm}^2\end{array}\right.$$

$\boxed{A_{s1,\,u} = 1,65 \text{ cm}^2 > 1,49 \text{ cm}^2 = A_{s,\,min}}$ O.K.

A_{s1} et $A_{s2} >< 0,04.A_c$ $\qquad A_{s1} = 1,65 \text{ cm}^2 < 43,2 \text{ cm}^2 = 0,04.18.60$ O.K.

4. Calcul des armatures tendues à l'ELS par compression du béton

$\mu_{ser} = \dfrac{M_{ser}}{b_w.d^2.\overline{\sigma_c}}$ $\qquad \mu_{ser} = \dfrac{0,03227}{0,18.0,55^2.18} = 0,0329$

$\Rightarrow \quad \alpha_1 = 1,5\left(1 - \sqrt{1 - \dfrac{8}{3}\mu_{ser}}\right)$ $\qquad \alpha_1 = 1,5\left(1 - \sqrt{1 - \dfrac{8}{3}0,0329}\right) = 0,0673$

$\Rightarrow \quad \sigma_{s1} = \alpha_e.\overline{\sigma_c}\dfrac{1 - \alpha_1}{\alpha_1}$ $\qquad \sigma_{s1} = 15.18\dfrac{1 - 0,0673}{0,0673} = 3\,741$ MPa

$$\Rightarrow \quad z_{c1} = d\left(1 - \frac{\alpha_1}{3}\right) \qquad z_{c1} = 0{,}55\left(1 - \frac{0{,}0673}{3}\right) = 0{,}538\,\text{m}$$

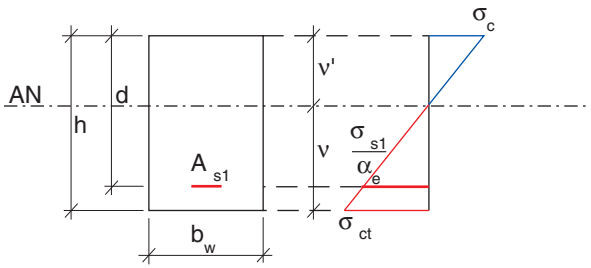
$$\Rightarrow \quad A_{s1,\,ser} = \frac{M_{ser}}{z_{c1}.\sigma_{s1}} \qquad \boxed{A_{s1,\,ser} = \frac{0{,}03227}{0{,}538.3\,741}10^4 = 0{,}16\ \text{cm}^2}$$

Remarque

L'objet de cette application étant de comparer les niveaux de contraintes en service entre les sections fissurées et non fissurées, nous ferons abstraction de la vérification de la section minimale d'armatures pour la suite.

5. Vérification des contraintes à l'ELS

5.1 Contraintes dans la section non fissurée



Nous prendrons en compte la section d'aciers déterminée par le calcul à l'ELU. Il est évident que :

- pour la section d'armatures réelle ;
- ou pour la section calculée à partir du diagramme σ–ε à palier horizontal ;

qui lui sont supérieures, les contraintes trouvées seront inférieures à celles déterminées ci-après.

5.1.1 Caractéristiques géométriques de la section non fissurée

Pour la section d'armatures $A_{s1,\,u}$ calculée : $A_{s1} = A_{s1,\,u} = 1{,}65\ \text{cm}^2$

$$A_{ch} = b_w.h + \alpha_e\left(A_{s1} + A_{s2}\right) \qquad A_{ch} = 0{,}18.0{,}60 + 15.1{,}65.10^{-4} = 0{,}1105\ \text{m}^2$$

$$v' = \frac{\frac{b_w.h^2}{2} + \alpha_e\left(A_{s1}.d + A_{s2}.d'\right)}{A_{ch}}$$

$$v' = \frac{\frac{0{,}18.0{,}60^2}{2} + 15.1{,}65.10^{-4}.0{,}55}{0{,}1105} = 0{,}306\ \text{m}$$

$$v = h - v' \qquad v = 0{,}60 - 0{,}306 = 0{,}294\ \text{m}$$

$$I_{ch} = \frac{b_w.h^3}{3} + \alpha_e \left(A_{s1}.d^2 + A_{s2}.d'^2 \right) - A_{ch}.v'^2$$

$$I_{ch} = \frac{0,18.0,60^3}{3} + 15.1,65.10^{-4}.0,55^2 - 0,1105.0,306^2 = 0,0033619 \text{ m}^4$$

5.1.2 Contrainte de traction du béton en fibre inférieure

$$\sigma_{ct} = \frac{M_{ser}.v}{I_{ch}} \qquad \sigma_{ct} = \frac{0,03227.0,294}{0,0033619} = 2,822 \text{ MPa}$$

$\sigma_{ct} >< f_{ct,\ eff}$ (voir § 3, valeur utilisée pour le calcul de $A_{s,\ min}$)

$$\sigma_{ct} = 2,822 \text{ MPa} < 2,896 \text{ MPa} = f_{ct,\ eff}$$

$\Rightarrow$ La section doit être considérée comme non fissurée pour la vérification des contraintes à l'ELS.

Le calcul en section fissurée est inutile. Néanmoins, nous le ferons ci-après, au § 5.2., à titre indicatif.

5.1.3 Contrainte de traction des armatures

$$\sigma_{s1} = \alpha_e \frac{M_{ser}\left(d - v'\right)}{I_{ch}} \qquad \sigma_{s1} = 15\frac{0,03227\left(0,55 - 0,306\right)}{0,0033619} = 35,13 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_{s1}}{f_{yk}} \qquad \frac{\sigma_{s1}}{f_{yk}} = \frac{35,13}{500} = 0,070$$

5.1.4 Contrainte de compression du béton

$$\sigma_c = \frac{M_{ser}.v'}{I_{ch}} \qquad \sigma_c = \frac{0,03227.0,306}{0,0033619} = 2,94 \text{ MPa}$$

Classe d'exposition XD2 $\Rightarrow$ $\sigma_c >< \overline{\sigma_c}$ $\sigma_c = 2,94$ MPa < 18 MPa O.K.

5.2 Contraintes à l'ELS dans le cas de la section de béton fissurée

5.2.1 Position de l'axe neutre

$$\frac{b_w.x_1^2}{2} + \alpha_e A_{s1}.x_1 - \alpha_e.A_{s1}.d = 0$$

$$\frac{0,18.x_1^2}{2} + 15.1,65.10^{-4}.x_1 - 15.1,65.10^{-4}.0,55 = 0$$

$$0,09.x_1^2 + 0,00248.x_1 - 0,001361 = 0$$

$$\Delta = 0,00248^2 + 4.0,09.0,001361 = 0,02227^2$$

$$x_1 = \frac{-0,00248 + 0,02227}{2.0,09} = 0,1099 \text{ m}$$

$$\alpha_1 = \frac{0,1099}{0,55} = 0,200$$

5.2.2 Moment d'inertie de la section fissurée

$$I_{cf} = \frac{b_w.x_1^3}{3} + \alpha_e.A_{s1}\left(d - x_1\right)^2$$

$$I_{cf} = \frac{0,18.0,1099^3}{3} + 15.1,65.10^{-4}\left(0,55 - 0,1099\right)^2 = 0,000559 \text{ m}^4$$

5.2.3 Contraintes

$$K = \frac{M_{ser}}{I_{cf}} \qquad K = \frac{0,03227}{0,000559} = 57,73 \text{ MN/m}^3$$

Classe d'exposition XD2 $\Rightarrow$ $\sigma_c = K.x_1 >< \overline{\sigma_c}$

$$\boxed{\sigma_c = 57,73.0,1099 = 6,34 \text{ MPa} < 18 \text{ MPa O.K.}}$$

$$\sigma_{s1} = \alpha_e.K\left(d - x_1\right) >< \overline{\sigma_s}$$

$$\boxed{\sigma_{s1} = 15.57,73\left(0,55 - 0,1099\right) = 381 \text{ MPa} < 400 \text{ MPa O.K.}}$$

$$\frac{\sigma_{s1}}{f_{yk}} \qquad \frac{\sigma_{s1}}{f_{yk}} = \frac{381}{500} = 0,762 < 0,8 = k_3$$

5.3 Remarque

Calcul en section non fissurée :

$\sigma_{c,\,nf} = 2,94$ MPa

$\sigma_{s1,\,nf} = 35,13$ MPa $= 0,07.f_{yk}$

Calcul en section fissurée :

$\sigma_{c,\,f} = 6,34$ MPa

$\sigma_{s1,\,f} = 381$ MPa $= 0,76.f_{yk}$

Conclusion :

$\sigma_{c,\,nf} << \sigma_{c,\,f}$ avec : $\dfrac{\sigma_{c,\,nf}}{\sigma_{c,\,f}} = \dfrac{2,94}{6,34} = 0,46$ faible

$\sigma_{s1,\,nf} << \sigma_{s1\,f}$ avec : $\dfrac{\sigma_{s1,\,nf}}{\sigma_{s1,\,f}} = \dfrac{35,13}{381} = 0,09$ très faible

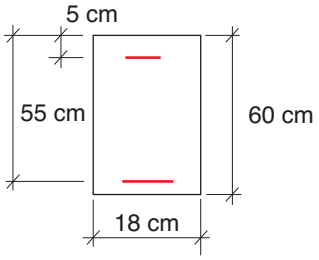
Pour les faibles valeurs de M_{Ed} , et donc de μ_{cu} , la vérification des contraintes à l'ELS doit être faite en considérant la section non fissurée. Néanmoins, en considérant la section fissurée, on se place en sécurité compte tenu :

- des faibles valeurs des contraintes ;
- du fait que les contraintes sont plus faibles pour la section non fissurée que pour la section fissurée.

Application n° 4 : section rectangulaire avec aciers comprimés

–Énoncé–

On considère la section rectangulaire définie ci-contre.



Sollicitations :

$M_{Ed} = 0,250$ mMN,

$M_{ser} = 0,179$ mMN,

$\alpha_e = \dfrac{E_s}{E_{c,\,eff}} = 15.$

Classe d'exposition XD2. Maîtrise de la fissuration non requise.

Matériaux :

- béton : $f_{ck} = 25$ MPa, $\varepsilon_{cu2} = \varepsilon_{cu3} = 3,5 / 1\,000$;
- aciers : S 500 A.

On se propose :

1/ de déterminer le ferraillage de cette section à l'ELU dans le cas du diagramme σ–ε d'acier à palier incliné,

2/ de déterminer le ferraillage de cette section à l'ELU dans le cas du diagramme σ–ε d'acier à palier horizontal,

3/ de vérifier les contraintes à l'ELS.

–Corrigé–

1. Caractéristiques des matériaux

1.1 Béton

$f_{ck} >< 50$ MPa $\Rightarrow \begin{cases} \lambda, \\ \eta \end{cases}$ $\qquad$ $f_{ck} = 25$ MPa < 50 MPa $\Rightarrow \begin{cases} \lambda = 0,8 \\ \eta = 1 \end{cases}$

$f_{cu} = \eta.\alpha_{cc} \dfrac{f_{ck}}{\gamma_c}$ $\qquad$ $f_{cu} = 1.1\dfrac{25}{1,5} = 16,7$ MPa

$f_{ck} \leq 50$ MPa $\Rightarrow$ $f_{ctm} = 0,3\left[f_{ck}\right]^{2/3}$ $\qquad$ $f_{ctm} = 0,3\left[25\right]^{2/3} = 2,56$ MPa

$\overline{\sigma_c} = k_1.f_{ck}$ $\qquad$ $\overline{\sigma_c} = 0,6.25 = 15$ MPa

1.2 Aciers

$f_{yd} = \dfrac{f_{yk}}{\gamma_s}$ $\qquad$ $f_{yd} = \dfrac{500}{1,15} = 435$ MPa

$\overline{\sigma_s} = k_3.f_{yk}$ $\qquad$ $\overline{\sigma_s} = 0,8.500 = 400$ MPa

2. Sollicitations de flexion

2.1 Moments fléchissants

M_{Ed} $\qquad$ $M_{Ed} = 0,250$ mMN

M_{ser} $\qquad$ $M_{ser} = 0,179$ mMN

2.2 Coefficient γ

$\gamma = \dfrac{M_{Ed}}{M_{ser}}$ $\qquad$ $\gamma = \dfrac{0,250}{0,179} = 1,40$

3. Calcul des armatures tendues à l'ELU dans le cas du diagramme σ–ε à palier incliné

3.1 Nécessité d'aciers comprimés

$\mu_{cu} = \dfrac{M_{Ed}}{b_w.d^2.f_{cu}}$ $\qquad$ $\mu_{cu} = \dfrac{0,250}{0,18.0,55^2.16,7} = 0,2749$

$f_{ck} = 25$ MPa,
S 500 A,
$\gamma = 1{,}40$,
σ_c limitée (classe XD)
$\Rightarrow \mu_{lu}(15)$ $\quad \mu_{lu}(15) = 0{,}2252$ (voir tableau du § 2.3.1 des rappels théoriques)

$A = 75{,}3.f_{ck} - 189{,}8$ $\quad A = 75{,}3.25 - 189{,}8 = 1\,692{,}7$

$B = -5{,}6.f_{ck} + 874{,}5$ $\quad B = -5{,}6.25 + 874{,}5 = 734{,}5$

$C = 0{,}04.f_{ck} - 13$ $\quad C = 0{,}04.25 - 13 = -12$

$$K = \left(A + B.\alpha_e + C.\alpha_e^2\right).10^{-4}$$

$$K = \left(1\,692{,}7 + 734{,}5.15 - 12.15^2\right).10^{-4} = 1{,}001$$

$\mu_{lu} = \mu_{lu}(15).K$ $\quad \alpha_e = 15 \Rightarrow \mu_{lu} = 0{,}2252$

Remarque 1

La formule approchée donne :

$$\mu_{lu} = \frac{f_{ck}}{(4{,}62 - 1{,}66.\gamma)f_{ck} + (165{,}69 - 79{,}62.\gamma)} K$$

$$\mu_{lu} = \frac{25}{(4{,}62 - 1{,}66.1{,}4)25 + (165{,}69 - 79{,}62.1{,}4)} 1 = 0{,}2240$$

$\mu_{lu} = 0{,}2240 \approx 0{,}2252$ O.K.

avec un écart de : $\dfrac{\Delta\mu_{lu}}{\mu_{lu}} = \dfrac{0{,}2252 - 0{,}2240}{0{,}2252} 100 = 0{,}5\ \%$

Remarque 2

Le calcul des coefficients A, B, C et K ci-dessus est inutile puisque $\alpha_e = 15$.

Il montre que pour $\alpha_e = 15$ on a bien k =1.

$\mu_{cu} > < \mu_{lu}$ $\quad \mu_{cu} = 0{,}2749 > 0{,}2252 = \mu_{lu} \Rightarrow \boxed{A_{s2} \neq 0}$

3.2 Aciers comprimés

Moment limite ultime :

$M_{lu} = \mu_{lu}.b_w.d^2.f_{cu}$ $\quad M_{lu} = 0{,}2252.0{,}18.0{,}55^2.16{,}7$

$M_{lu} = 0{,}2048$ mMN

Contrainte équivalente des aciers comprimés :

$$A = -\frac{5}{\alpha_e} + 13 \qquad A = -\frac{5}{15} + 13 = 12{,}67 \approx 13$$

$$B = \frac{6\,855}{\alpha_e} - 9 \qquad B = \frac{6\,855}{15} - 9 = 448$$

$$\sigma_{s2,\,e} = 0,6.\alpha_e.\gamma.f_{ck} - \delta'\left[A.f_{ck} + B\right]$$

$$\sigma_{s2,\,e} = 0,6.15.1,4.25 - \frac{5}{55}\left[13.25 + 448\right] = 245 \text{ MPa}$$

Section d'aciers comprimés :

$$A_{s2} = \frac{M_{Ed} - M_{lu}}{(d - d').\sigma_{s2,\,e}} \qquad \boxed{A_{s2} = \frac{0,250 - 0,2048}{(0,55 - 0,05).245}10^4 = 3,69 \text{ cm}^2}$$

3.3 Aciers tendus

$$\alpha_u = \frac{1}{\lambda}\left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{lu}}\right] \qquad \alpha_u = \frac{1}{0,8}\left[1 - \sqrt{1 - 2.0,2252}\right] = 0,323$$

Classe de ductilité et f_{ck} $\Rightarrow$ μ_{AB} Aciers S 500 A et $f_{ck} = 25$ MPa

$$\Rightarrow \begin{cases} \alpha_{AB} = 0,1346 \\ \mu_{AB} = 0,1019 \end{cases}$$

$\Rightarrow$ $\mu_{lu} >< \mu_{AB}$ $\qquad \mu_{lu} = 0,2252 > 0,1019 = \mu_{AB}$ $\Rightarrow$ Pivot B

$$\Rightarrow \varepsilon_c = \varepsilon_{cu2} = \varepsilon_{cu3} = \frac{3,5}{1\,000}$$

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_c \frac{1 - \alpha_u}{\alpha_u} \qquad \varepsilon_{s1} = \frac{3,5}{1\,000}.\frac{1 - 0,323}{0,323} = \frac{7,336}{1\,000}$$

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} \qquad \varepsilon_{yd} = \frac{435}{2.10^5} = \frac{2,175}{1\,000}$$

$\varepsilon_{s1} >< \varepsilon_{yd}$ $\qquad \varepsilon_{s1} = \dfrac{7,336}{1\,000} > \dfrac{2,175}{1\,000} = \varepsilon_{yd}$ $\Rightarrow$ palier du diagramme σ–ε de l'acier

$$\sigma_{s1} = 432,71 + 952,38.\varepsilon_{s1} \not> 454 \text{ (MPa)}$$

$$\sigma_{s1} = 432,71 + 952,38.7,336.10^{-3} = 440 \text{ MPa}$$

$$\Rightarrow z_c = d\left[1 - \frac{\lambda}{2}\alpha_u\right] \qquad z_c = 0,55\left[1 - \frac{0,8}{2}0,323\right] = 0,479 \text{ m}$$

Remarque

La formule approchée donne :

$\mu_{lu} \leq 0,225$ $\Rightarrow$ $z_c = d\,[1 - 0,6.\mu_{lu}]$

$\mu_{lu} \leq 0,2252 \approx 0,225$ $\Rightarrow$ $z_c = 0,55\,[1 - 0,6.0,2252] = 0,476$ m

$$\sigma_{s1,\,e} = [A.f_{ck} + B] - 0,6.\alpha_e.\gamma.f_{ck}$$

$$\sigma_{s1,\,e} = [13.25 + 448] - 0,6.15.1,4.25 = 458 \text{ MPa}$$

$$\Rightarrow \quad A_{s1,\,u} = \frac{M_{lu}}{z_c.\sigma_{s1}} + A_{s2}\frac{\sigma_{s2,\,e}}{\sigma_{s1,\,e}}$$

$$\boxed{A_{s1,\,u} = \frac{0{,}2048}{0{,}479.440}10^4 + 3{,}69\,\frac{245}{458} = 11{,}69\ \text{cm}^2}$$

3.4 Section minimale d'armatures

Maîtrise de la fissuration non requise $\Rightarrow$

$$f_{ct,\,eff} = f_{ctm,\,fl} = \text{Max}\begin{cases}\left(1{,}6 - \dfrac{h}{1\,000}\right) f_{ctm} \\ f_{ctm}\end{cases}$$

$$f_{ct,\,eff} = 2{,}56\ \text{MPa} = \text{Max}\begin{cases}\left(1{,}6 - \dfrac{600}{1\,000}\right) 2{,}56 = 2{,}56\ \text{MPa} \\ f_{ctm} = 2{,}56\ \text{MPa}\end{cases}$$

$$A_{s1} >< A_{s,\,min} = \text{Max}\begin{cases}0{,}26\dfrac{f_{ct,\,eff}}{f_{yk}} b_t.d \\ 0{,}0013.b_t.d\end{cases}$$

$$A_{s,\,min} = 1{,}32\ \text{cm}^2 = \text{Max}\begin{cases}0{,}26\dfrac{2{,}56}{500}18.55 = 1{,}32\ \text{cm}^2 \\ 0{,}0013.18.55 = 1{,}29\ \text{cm}^2\end{cases}$$

$$\boxed{A_{s1,\,u} = 11{,}69\ \text{cm}^2 > 1{,}32\ \text{cm}^2 = A_{s,\,min}}\ \text{O.K.}$$

$A_{sl,\,u}$ et $A_{s2} >< 0{,}04.A_c$

$$\left.\begin{aligned}A_{s1,\,u} &= 11{,}69\ \text{cm}^2 \\ A_{s2} &= 3{,}69\ \text{cm}^2\end{aligned}\right\} < 43{,}2\ \text{cm}^2 = 0{,}04.18.60\ \text{O.K.}$$

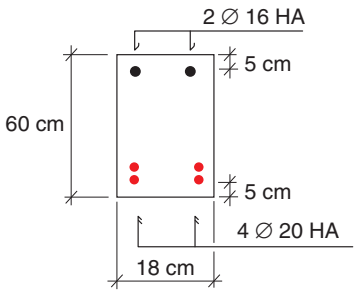
En prenant deux files verticales :

- aciers comprimés :

$\boxed{2\,\phi\,16\ \text{HA} : 2.2{,}01 = 4{,}02\ \text{cm}^2}$

- aciers tendus :

$\boxed{4\,\phi\,20\ \text{HA} : 4.3{,}14 = 12{,}56\ \text{cm}^2}$



4. Calcul des armatures tendues à l'ELU dans le cas du diagramme σ–ε à palier horizontal

4.1 Nécessité d'aciers comprimés

$$\mu_{cu} = \frac{M_{Ed}}{b_w.d^2.f_{cu}} \qquad \mu_{cu} = \frac{0,250}{0,18.0,55^2.16,7} = 0,2749$$

$f_{ck} = 25$ MPa,
S 500 A,
$\gamma = 1,40$,
σ_c limitée (classe XD)
$\Rightarrow \mu_{lu}(15)$ $\quad \mu_{lu}(15) = 0,2265$ (voir tableau du § 2.3.1 des rappels théoriques)

$$\mu_{lu} = \mu_{lu}(15).K \qquad \alpha_e = 15 \Rightarrow \mu_{lu} = 0,2265$$

Remarque

La formule approchée donne :

$$\mu_{lu} = \frac{f_{ck}}{(4,69 - 1,70.\gamma)f_{ck} + (159,90 - 76,20.\gamma)}K$$

$$\mu_{lu} = \frac{25}{(4,69 - 1,70.1,4)25 + (159,90 - 76,20.1,4)}1$$

$$\mu_{lu} = 0,2253$$

$\mu_{lu} = 0,2253 \approx 0,2265$ O.K.

avec un écart de : $\frac{\Delta\mu_{lu}}{\mu_{lu}} = \frac{0,2265 - 0,2253}{0,2265}100 = 0,5\ \%$

$\mu_{cu} > < \mu_{lu}$ $\qquad \mu_{cu} = 0,2749 > 0,2265 = \mu_{lu} \Rightarrow \boxed{A_{s2} \neq 0}$

4.2 Aciers comprimés

Moment limite ultime :

$M_{lu} = \mu_{lu}.b_w.d^2.f_{cu}$ $\qquad M_{lu} = 0,2265.0,18.0,55^2.16,7 = 0,2060$ mMN

Contrainte équivalente des aciers comprimés :

$$A = \frac{0,5}{\alpha_e} + 13 \qquad A = \frac{0,5}{15} + 13 = 13$$

$$B = \frac{6\,517}{\alpha_e} + 1 \qquad B = \frac{6\,517}{15} + 1 = 435$$

$$\sigma_{s2,\,e} = 0,6.\alpha_e.\gamma.f_{ck} - \delta'\left[A.f_{ck} + B\right]$$

$$\sigma_{s2,\,e} = 0,6.15.1,4.25 - \frac{5}{55}\left[13.25 + 435\right] = 246 \text{ MPa}$$

Section d'aciers comprimés :

$$A_{s2} = \frac{M_{Ed} - M_{lu}}{(d - d').\sigma_{s2,\,e}} \qquad \boxed{A_{s2} = \frac{0,250 - 0,2060}{(0,55 - 0,05).246} 10^4 = 3,58 \text{ cm}^2}$$

4.3 Aciers tendus

$$\alpha_u = \frac{1}{\lambda}\left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{lu}}\right] \qquad \alpha_u = \frac{1}{0,8}\left[1 - \sqrt{1 - 2.0,2265}\right] = 0,326$$

Diagramme σ–ε à palier horizontal $\Rightarrow$ $\mu_{AB} = 0$

$\Rightarrow$ $\mu_{lu} >< \mu_{AB}$ $\qquad$ $\mu_{lu} = 0,2265 > 0 = \mu_{AB}$ $\Rightarrow$ Pivot B

$$\Rightarrow \quad \varepsilon_c = \varepsilon_{cu2} = \varepsilon_{cu3} = \frac{3,5}{1\,000}$$

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_c \frac{1 - \alpha_u}{\alpha_u} \qquad \varepsilon_{s1} = \frac{3,5}{1\,000}.\frac{1 - 0,326}{0,326} = \frac{7,236}{1\,000}$$

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} \qquad \varepsilon_{yd} = \frac{435}{2.10^5} = \frac{2,175}{1\,000}$$

$\varepsilon_{s1} >< \varepsilon_{yd}$ $\qquad$ $\varepsilon_{s1} = \dfrac{7,236}{1\,000} > \dfrac{2,175}{1\,000} = \varepsilon_{yd}$ $\Rightarrow$ palier du diagramme σ–ε de l'acier

$\sigma_{s1} = f_{yd}$ $\qquad$ $\sigma_{s1} = 435$ MPa

$$\Rightarrow \quad z_c = d\left[1 - \frac{\lambda}{2}\alpha_u\right] \qquad z_c = 0,55\left[1 - \frac{0,8}{2}0,326\right] = 0,478 \text{ m}$$

Remarque

La formule approchée donne :

$\mu_{lu} \leq 0,225 \Rightarrow z_c = d\,[1 - 0,6.\mu_{lu}]$

$\mu_{lu} \leq 0,2265 \approx 0,225 \Rightarrow z_c = 0,55\,[1 - 0,6.0,2265] = 0,475$ m

$$\sigma_{s1,\,e} = [A.f_{ck} + B] - 0,6.\alpha_e.\gamma.f_{ck}$$

$$\sigma_{s1,\,e} = [13.25 + 435] - 0,6.15.1,4.25 = 445 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{s1,\,e} = 445 \text{ MPa} > 435 \text{ MPa} = f_{yd} \Rightarrow \sigma_{s1,\,e} = 435 \text{ MPa}$$

$$\Rightarrow \quad A_{s1,\,u} = \frac{M_{lu}}{z_c.\sigma_{s1}} + A_{s2}\frac{\sigma_{s2,\,e}}{\sigma_{s1,\,e}}$$

$$\boxed{A_{s1,\,u} = \frac{0,2060}{0,478.435} 10^4 + 3,58\,\frac{246}{435} = 11,93 \text{ cm}^2}$$

4.4 Section minimale d'armatures

(voir § 3.4) $\boxed{A_{s1,\,u} = 11{,}93\ \text{cm}^2 > 1{,}32\ \text{cm}^2 = A_{s,\,min}}$ O.K.

$A_{sl,\,u}$ et $A_{s2} > < 0{,}04.A_c$

$$\left.\begin{aligned} A_{s1,\,u} &= 11{,}93\ \text{cm}^2 \\ A_{s2} &= 3{,}58\ \text{cm}^2 \end{aligned}\right\} < 43{,}2\ \text{cm}^2 = 0{,}04.18.60 \text{ O.K.}$$

En prenant deux files verticales :

- aciers comprimés :

$\boxed{2\,\phi\,16\ \text{HA} : 2.2{,}01 = 4{,}02\ \text{cm}^2}$

- aciers tendus :

$\boxed{4\,\phi\,20\ \text{HA} : 4.3{,}14 = 12{,}56\ \text{cm}^2}$

Remarque

L'écart avec l'utilisation du diagramme σ–ε à palier incliné vaut :

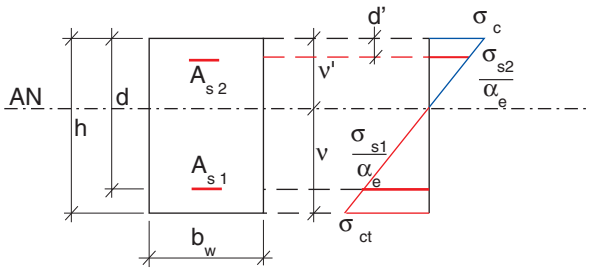
– Diagramme σ–ε à palier incliné : $A_{s1} + A_{s2} = 11{,}69 + 3{,}69 = 15{,}38\ \text{cm}^2$

– Diagramme σ–ε à palier horizontal : $A_{s1} + A_{s2} = 11{,}93 + 3{,}58 = 15{,}51\ \text{cm}^2$

– Écart : $\dfrac{\Delta A}{A} = \dfrac{15{,}51 - 15{,}38}{15{,}38} 10^2 = 0{,}8\ \%$

5. Vérification des contraintes à l'ELS

5.1 Contraintes dans la section non fissurée



Nous prendrons en compte les sections d'aciers déterminées par le calcul dans le cas du diagramme σ–ε à palier incliné. Il est évident que :

- pour la section d'armatures réelle ;
- ou pour la section calculée à partir du diagramme σ–ε à palier horizontal ;

qui leur sont supérieures, les contraintes trouvées seront inférieures à celles déterminées ci-après.

5.1.1 Caractéristiques géométriques de la section non fissurée

Pour les sections d'armatures $A_{s1,\,u}$ et A_{s2} calculées :

$$A_{s1} = A_{s1,\,u} = 11{,}69 \text{ cm}^2 \text{ et } A_{s2} = 3{,}69 \text{ cm}^2$$

$$A_{ch} = b_w.h + \alpha_e \left(A_{s1} + A_{s2}\right)$$

$$A_{ch} = 0{,}18.0{,}60 + 15(11{,}69 + 3{,}69).10^{-4} = 0{,}1311 \text{ m}^2$$

$$v' = \frac{\frac{b_w.h^2}{2} + \alpha_e \left(A_{s1}.d + A_{s2}.d'\right)}{A_{ch}}$$

$$v' = \frac{\frac{0{,}18.0{,}60^2}{2} + 15(11{,}69.0{,}55 + 3{,}69.0{,}05).10^{-4}}{0{,}1311} = 0{,}323 \text{ m}$$

$$v = h - v' \qquad v = 0{,}60 - 0{,}323 = 0{,}277 \text{ m}$$

$$I_{ch} = \frac{b_w.h^3}{3} + \alpha_e \left(A_{s1}.d^2 + A_{s2}.d'^2\right) - A_{ch}.v'^2$$

$$I_{ch} = \frac{0{,}18.0{,}60^3}{3} + 15\left(11{,}69.0{,}55^2 + 3{,}69.0{,}05^2\right).10^{-4} - 0{,}1311.0{,}323^2 = 0{,}0046006 \text{ m}^4$$

5.1.2 Contrainte de traction du béton en fibre inférieure

$$\sigma_{ct} = \frac{M_{ser}.v}{I_{ch}} \qquad \sigma_{ct} = \frac{0{,}179.0{,}277}{0{,}004606} = 10{,}78 \text{ MPa}$$

σ_{ct} >< $f_{ct,\,eff}$ (voir § 3.4, valeur utilisée pour le calcul de $A_{s,\,min}$)

$$\sigma_{ct} = 10{,}78 \text{ MPa} > 2{,}56 \text{ MPa} = f_{ct,\,eff}$$

⇒ La section doit être considérée comme fissurée pour la vérification des contraintes à l'ELS.

5.2 Contraintes à l'ELS dans le cas de la section de béton fissurée

5.2.1 Position de l'axe neutre

$$\frac{b_w.x_1^2}{2} + \alpha_e \left(A_{s1} + A_{s2}\right).x_1 - \alpha_e.\left(A_{s1}.d + A_{s2}.d'\right) = 0$$

$$\frac{0{,}18.x_1^2}{2} + 15(11{,}69 + 3{,}69).10^{-4}.x_1 - 15(11{,}69.0{,}55 + 3{,}69.0{,}05).10^{-4} = 0$$

$$0{,}09.x_1^2 + 0{,}02307.x_1 - 0{,}00992 = 0$$

$$\Delta = 0{,}02307^2 + 4.0{,}09.0{,}00992 = 0{,}0641^2$$

$$x_1 = \frac{-0{,}02307 + 0{,}0641}{2.0{,}09} = 0{,}228 \text{ m}$$

5.2.2 Moment d'inertie de la section fissurée

$$I_{cf} = \frac{b_w.x_1^3}{3} + \alpha_e.A_{s1}(d - x_1)^2 + \alpha_e.A_{s2}(x_1 - d')^2$$

$$I_{cf} = \frac{0,18.0,228^3}{3} + 15.11,69.10^{-4}(0,55 - 0,228)^2 + 15.3,69.10^{-4}(0,228 - 0,05)^2$$

$$I_{cf} = 0,002705\ m^4$$

5.2.3 Contraintes

$$K = \frac{M_{ser}}{I_{cf}} \qquad K = \frac{0,179}{0,002705} = 66,17\ MN/m^3$$

Classe d'exposition XD2 $\Rightarrow$ $\sigma_c = K.x_1 >< \overline{\sigma_c}$

$$\sigma_c = 66,17.0,228 = 15,09\ MPa \approx 15\ MPa = \overline{\sigma_c}$$

$$\sigma_{s1} = \alpha_e.K(d - x_1) >< \overline{\sigma_s}$$

$$\sigma_{s1} = 15.66,17(0,55 - 0,228) = 320\ MPa < 400\ MPa\ O.K.$$

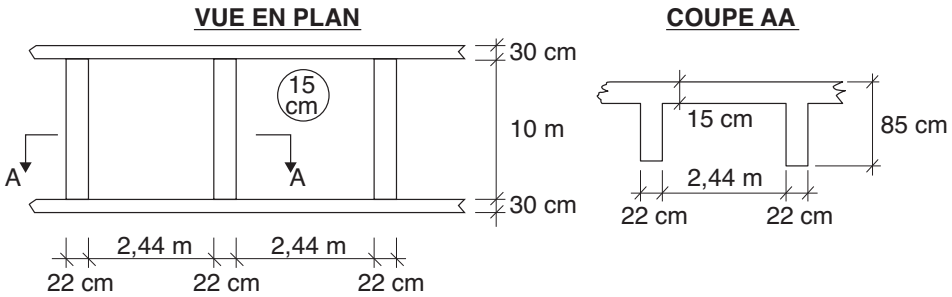
$$\frac{\sigma_{s1}}{f_{yk}} \qquad \frac{\sigma_{s1}}{f_{yk}} = \frac{320}{500} = 0,64 < 0,8 = k_3$$

$\sigma_{s2} = \alpha_e\, k\, (x_1 - d')$ $\qquad$ $\sigma_{s2} = 15.66,17(0,228 - 0,05)$

$\sigma_{s2} = 177\ MPa$

Application n° 5 : section à table de compression

–Énoncé–



On considère les poutres du plancher ci-dessus, appuyées sur deux murs parallèles de 30 cm d'épaisseur.

Actions uniformément réparties :

- variables : $q = 10\ kN/m^2$;
- $\alpha_e = \dfrac{E_s}{E_{c,\,eff}} = 15.$

Classe d'exposition XC2. Maîtrise de la fissuration non requise.

Enrobage des armatures : $c_{nom} = 3$ cm.

Matériaux :

- béton : $f_{ck} = 25$ MPa, $\varepsilon_{cu2} = \varepsilon_{cu3} = 3{,}5 / 1\ 000$;
- aciers : S 500 avec diagramme σ–ε à palier horizontal.

On se propose :
1/ de déterminer les armatures en travée dans les poutrelles ;
2/ de calculer les contraintes à l'état limite de service.

–Corrigé–

1. Caractéristiques des matériaux

1.1 Béton

$f_{ck} >< 50$ MPa $\Rightarrow \begin{cases} \lambda, \\ \eta \end{cases}$ $\qquad$ $f_{ck} = 25$ MPa < 50 MPa $\Rightarrow \begin{cases} \lambda = 0{,}8 \\ \eta = 1 \end{cases}$

$f_{cu} = \eta.\alpha_{cc} \dfrac{f_{ck}}{\gamma_c}$ $\qquad$ $f_{cu} = 1.1 \dfrac{25}{1{,}5} = 16{,}7$ MPa

$f_{ck} \leq 50$ MPa $\Rightarrow$ $f_{ctm} = 0{,}3\left[f_{ck}\right]^{2/3}$ $\qquad$ $f_{ctm} = 0{,}3\left[25\right]^{2/3} = 2{,}56$ MPa

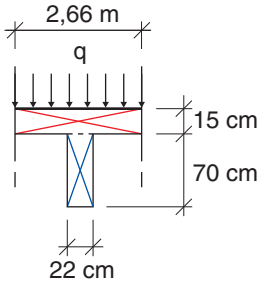
$\overline{\sigma_c} = k_1.f_{ck}$ $\qquad$ $\overline{\sigma_c} = 0{,}6.25 = 15$ MPa

1.2 Aciers

$f_{yd} = \dfrac{f_{yk}}{\gamma_s}$ $\qquad$ $f_{yd} = \dfrac{500}{1{,}15} = 435$ MPa

$\overline{\sigma_s} = k_3.f_{yk}$ $\qquad$ $\overline{\sigma_s} = 0{,}8.500 = 400$ MPa

2. Sollicitation de flexion dans les poutrelles



2.1 Actions permanentes

Poids propre dalle : $25\ kN/m^3.0,15.2,66 = 9,98\ kN/m$

Poids propre retombée : $25\ kN/m^3.0,70.0,22 = 3,85\ kN/m$

$$g = 13,83\ kN/m^2$$

2.2 Actions variables

$10\ kN/m^2.2,66 = 26,6\ kN/m = q$

2.3 Portée utile de calcul

(voir § 2.3, chapitre 1 : « Analyse structurale », *Maîtriser l'eurocode 2*, J. Roux, Éditions Eyrolles, 2009)

Poutre isostatique $\Rightarrow$ $a = \text{Min}\begin{cases}\frac{1}{2}t\\ \frac{1}{2}h\end{cases}$ $a = 0,15\ m = \text{Min}\begin{cases}\frac{1}{2}0,30 = 0,15\ m\\ \frac{1}{2}0,85 = 0,425\ m\end{cases}$

Portée entre nus d'appuis : $l_n = 10,00\ m$

$l_{eff} = l_n + a_1 + a_2 = l_n + 2.a$ $\qquad$ $l_{eff} = 10,00 + 2.0,15 = 10,30\ m$

2.4 État limite ultime

Charges au ml :

$p_u = 1,35.g + 1,5.q$ $\qquad$ $p_u = 1,35.13,83 + 1,5.26,6$

$p_u = 58,57\ kN/m$

Moment fléchissant maximal :

$M_{Ed} = p_u \frac{l_{eff}^2}{8}$ $\qquad$ $M_{Ed} = 58,57 \frac{10,30^2}{8}$

$M_{Ed} = 776,71\ mkN = 0,777\ mMN$

2.5 État limite de service

Charges au ml :

$p_{ser} = g + q$ $\qquad p_{ser} = 13,83 + 26,6$

$p_{ser} = 40,43$ kN/m

Moment fléchissant maximal :

$M_{ser} = p_{ser} \dfrac{l_{eff}^2}{8}$ $\qquad M_{ser} = 40,43 \dfrac{10,30^2}{8}$

$M_{ser} = 536,15$ mkN = 0,536 mMN

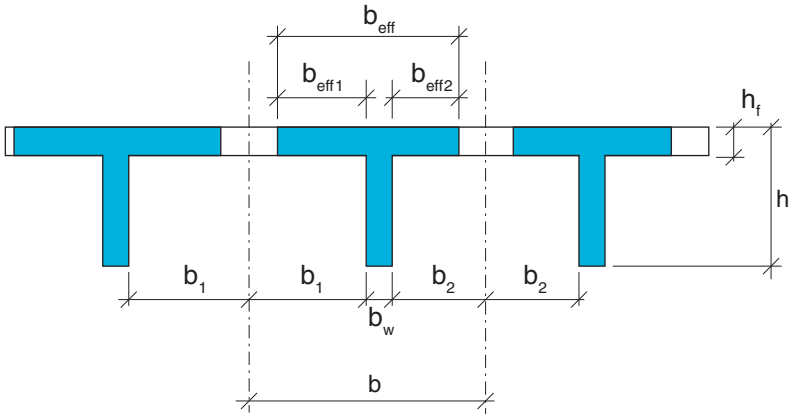
2.6 Coefficient γ

$\gamma = \dfrac{M_{Ed}}{M_{ser}}$ $\qquad \gamma = \dfrac{0,777}{0,536} = 1,45$

3. Armatures

3.1 Largeur de table à prendre en compte

(voir § 2.2, chapitre 1 : « Analyse structurale », *Maîtriser l'eurocode 2*, J. Roux, Éditions Eyrolles, 2009)



l_0 = distance entre points de moments nuls des poutrelles : $l_0 = l_{eff} = 10,30$ m

$$b_{eff,\,i} = \text{Min}\begin{cases} 0,2.b_i + 0,10.l_0 \\ 0,2.l_0 \\ b_i \end{cases}$$

$$b_{eff,\,i} = 1,22\ \text{m} = \text{Min}\begin{cases} 0,2\dfrac{2,44}{2} + 0,10.10,30 = 1,274\ \text{m} \\ 0,2.10,30 = 2,06\ \text{m} \\ \dfrac{2,44}{2} = 1,22\ \text{m} \end{cases}$$

$$b_{eff} = \text{Min}\begin{cases} \sum b_{eff,\,i} + b_w \\ b \end{cases}$$

$$b_{eff} = 2,66\ \text{m} = \text{Min}\begin{cases} 2.1,22 + 0,22 = 2,66\ \text{m} \\ 2,66\ \text{m} \end{cases}$$

3.2 Dimensionnement de l'armature à l'ELU

3.2.1 Moment de référence

$d \approx h - 5$ cm $\qquad$ $d = 85 - 5 = 80$ cm

$$M_{Tu} = b_{eff}.h_f.f_{cu}\left(d - \frac{h_f}{2}\right) \qquad M_{Tu} = 2,66.0,15.16,7\left(0,80 - \frac{0,15}{2}\right)$$

$$M_{Tu} = 4,831\ \text{mMN}$$

3.2.2 Armatures à l'ELU

Type de section à considérer :

$M_{Ed} >< M_{Tu}$ $\qquad$ $M_{Ed} = 0,777\ \text{mMN} < 4,831\ \text{mMN} = M_{Tu}$

$\Rightarrow$ La zone comprimée a une forme rectangulaire et l'AN tombe dans la table.

$\Rightarrow$ Le béton tendu étant négligé, calcul en section rectangulaire de largeur b_{eff}.

Nécessité d'aciers comprimés :

$$\mu_{cu} = \frac{M_{Ed}}{b_{eff}.d^2.f_{cu}} \qquad \mu_{cu} = \frac{0,777}{2,66.0,80^2.16,7} = 0,0273$$

$f_{ck} = 25$ MPa,
S 500 A,
$\gamma = 1,40$,
σ_c limitée (classe XC)
$\Rightarrow \mu_{lu}(15)$ $\qquad$ $\mu_{lu} = \mu_{ls} = 0,3717\ \forall\ \alpha_e$ (voir tableau du § 2.3.1 des rappels théoriques).

$\mu_{cu} >< \mu_{lu}$ $\qquad$ $\mu_{cu} = 0,0273 < 0,377 = \mu_{lu}$ $\Rightarrow$ $\boxed{A_{s2} = 0}$

Section d'aciers tendus :

Diagramme σ–ε à palier horizontal $\Rightarrow$ $\mu_{AB} = 0$

$\Rightarrow$ $\mu_{cu} > < 0,225.K$ $\Rightarrow$ formule pour z_c

$\alpha_e = 15 \Rightarrow k = 1 \Rightarrow \mu_{cu} = 0,0273 < 0,225 \Rightarrow$ formule approchée

$\Rightarrow z_c = d\left[1 - 0,6.\mu_{cu}\right]$ $\quad z_c = 0,80\left[1 - 0,6.0,0273\right] = 0,787$ m

$\sigma_{s1} = f_{yd}$ $\quad \sigma_{s1} = f_{yd} = 435$ MPa

$$\Rightarrow A_{s1,\,u} = \frac{M_{Ed}}{z_c.f_{yd}} \qquad \boxed{A_{s1,\,u} = \frac{0,777}{0,787.435}10^4 = 22,70 \text{ cm}^2}$$

3.3 Conclusion – Armatures à retenir

3.3.1 Section calculée

$A_{s1} = A_{s1,\,u}$ $\quad A_{s1} = 22,70$ cm^2

3.3.2 Pourcentage minimal d'armatures (maîtrise de la fissuration non requise)

Maîtrise de la fissuration non requise $\Rightarrow f_{ct,\,eff} = f_{ctm,\,fl} = \text{Max}\begin{cases}\left(1,6 - \dfrac{h}{1\,000}\right)f_{ctm} \\ f_{ctm}\end{cases}$

$$f_{ct,\,eff} = 2,56 \text{ MPa} = \text{Max}\begin{cases}\left(1,6 - \dfrac{850}{1\,000}\right)2,56 = 1,92 \text{ MPa} \\ f_{ctm} = 2,56 \text{ MPa}\end{cases}$$

$$A_{s1} >< A_{s,\,min} = \text{Max}\begin{cases}0,26\dfrac{f_{ct,\,eff}}{f_{yk}}b_t.d \\ 0,0013.b_t.\mathbf{d}\end{cases}$$

$$A_{s,\,min} = 2,34 \text{ cm}^2 = \text{Max}\begin{cases}0,26\dfrac{2,56}{500}22.80 = 2,34 \text{ cm}^2 \\ 0,0013.22.80 = 2,29 \text{ cm}^2\end{cases}$$

$\boxed{A_{s1} = 22,70 \text{ cm}^2 > 2,34 \text{ cm}^2 = A_{s,\,min}}$ O.K.

$A_{s1,\,u}$ et $A_{s2} >< 0,04.A_c$

$A_{s1,\,u} = 22,70 \text{ cm}^2 < 221,2 \text{ cm}^2 = 0,04.[266.15 + 70.22$ O.K.

3.3.3 Retenu

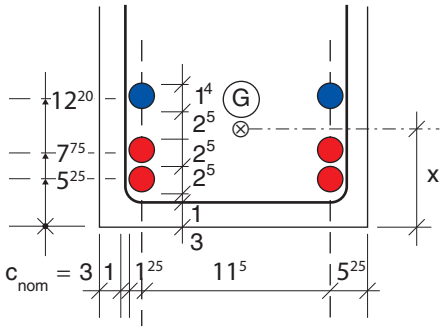
A $\quad A = 22,70$ cm^2

Retenons deux files verticales

Pas plus de deux barres superposées dans chaque file verticale.

Lit 1 : 2 ϕ 25 HA	⇒	2.4,91 = 9,82 cm^2
Lit 1 : 2 ϕ 25 HA	⇒	2.4,91 = 9,82 cm^2
Lit 1 : 2 ϕ 14 HA	⇒	2.1,54 = 3,08 cm^2
		A = 22,72 cm^2

avec : ϕ_t = 10 mm

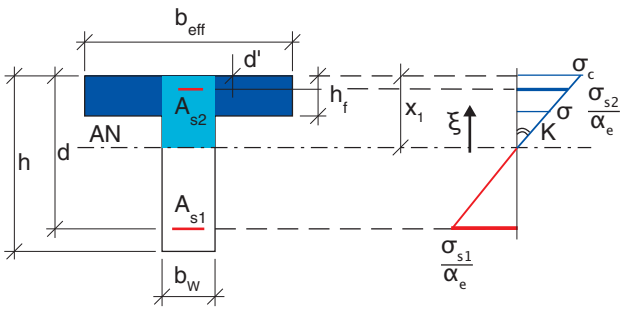


$$x = \frac{9,82.5,25 + 9,82.7,75 + 3,08.12,20}{22,72} = 7,27 \text{ cm}$$

$$d = h - x = 85 - 7,27 = 77,73 \text{ cm}$$

4. Vérification des contraintes à l'ELS

4.1 Position de l'axe neutre



b_{eff} = 2,66 m

b_w = 0,22 m

d = 77,73 cm

h_f = 15 cm

A_{s1} = 22,72 cm^2

α_e = 15

$$K = \frac{\sigma}{\xi} = \frac{M_{ser}}{I_{cf}}$$

Type de section à considérer :

$$f(h_f) = \frac{b_{eff}.h_f^2}{2} + \alpha_e (A_{s1} + A_{s2}) h_f - \alpha_e (A_{s1}.d + A_{s2}.d') >< 0$$

$$f(h_f) = \frac{266}{2}15^2 + 15.22,72.15 - 15.22,72.77,73$$

$$f(h_f) = 8546,62\ cm^3 > 0$$

$\Rightarrow$ AN dans la table et la section se comporte comme une section rectangulaire de largeur b_{eff}.

Profondeur de l'axe neutre :

$$\frac{b_{eff}.x_1^2}{2} + \alpha_e\left(A_{s1} + A_{s2}\right)x_1 - \alpha_e\left(A_{s1}.d + A_{s2}.d'\right) = 0$$

$$\frac{266.x_1^2}{2} + 15(22,72 + 0)x_1 - 15(22,72.77,73 + 0.d') = 0$$

$$133.x_1^2 + 340,80.x_1 - 26\,490,38 = 0$$

$$\Delta = 3\,769,49^2$$

$$x_1 = \frac{-340,80 + 3\,769,49}{2.133} = 12,89\ cm$$

$$x_1 = 12,89\ cm < 15\ cm = h_f$$

4.2 Moment d'inertie

$$I_{cf} = \frac{b_w.x_1^3}{3} + \alpha_e.A_{s1}(d - x_1)^2 + \alpha_e.A_{s2}(x_1 - d')^2$$

$$I_{cf} = 266\frac{12,89^3}{3} + 15.22,72(77,73 - 12,89)^2$$

$$I_{cf} = 1\,622\,698\ cm^4$$

4.3 Contraintes

$$K = \frac{M_{ser}}{I_{cf}} \qquad K = \frac{0,536}{1\,622\,698.10^{-8}} = 33,03\ MN/m^3$$

Classe d'exposition XC2 $\Rightarrow$ $\sigma_c = K.x_1$

$$\boxed{\sigma_c = 33,03.0,1289 = 4,3\ MPa}$$ non limitée

$\sigma_{s1} = \alpha_e.K(d - x_1) >< \overline{\sigma_s}$

$$\boxed{\sigma_{s1} = 15.33,03(0,7773 - 0,1289) = 321\ MPa < 400\ MPa = \overline{\sigma_s}\ \text{O.K.}}$$

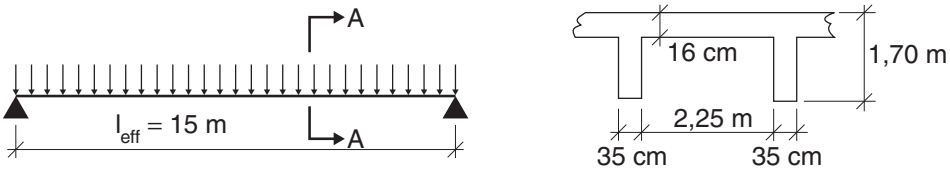
$\frac{\sigma_{s1}}{f_{yk}}$ $\qquad$ $\frac{\sigma_{s1}}{f_{yk}} = \frac{321}{500} = 0,64 < 0,8 = k_3$

Remarque

$$z_c = \frac{M_{ser}}{A.\sigma_{s1}} = \frac{0{,}536.10^4}{22{,}72.321} = 0{,}735\ \text{m} \quad \left(z_c = d - \frac{h_f}{2} = 0{,}725\ \text{m à 1 \% près}\right)$$

Application n° 6 : poutre à talon

–Énoncé–



On considère la poutre figurée ci-dessus extraite d'un tablier de pont constitué de poutres espacées de 2,60 m.

Actions uniformément réparties :

- permanentes : g_1 = 108,50 kN/m (hors poids propre) ;
- variables : q = 62 kN/m ;
- $\alpha_e = \dfrac{E_s}{E_{c,\,eff}} = 15.$

Classe d'exposition XD2. Classe structurale S4. Maîtrise de la fissuration non requise.

Matériaux :

- béton : f_{ck} = 25 MPa, $\varepsilon_{cu2} = \varepsilon_{cu3}$ = 3,5 / 1 000, d_g = 25 mm ;
- aciers : S 500 avec diagramme σ–ε à palier horizontal.

On se propose :
1/ de déterminer le ferraillage de la section médiane à l'ELU ;
2/ de vérifier les contraintes à l'ELS en supposant la section fissurée.

–Corrigé–

1. Caractéristiques des matériaux

1.1 Béton

$f_{ck} >< 50$ MPa $\Rightarrow \begin{cases} \lambda, \\ \eta \end{cases}$ $\qquad$ $f_{ck} = 25$ MPa < 50 MPa $\Rightarrow \begin{cases} \lambda = 0,8 \\ \eta = 1 \end{cases}$

$f_{cu} = \eta.\alpha_{cc} \dfrac{f_{ck}}{\gamma_c}$ $\qquad$ $f_{cu} = 1.1 \dfrac{25}{1,5} = 16,7$ MPa

$f_{ck} \leq 50$ MPa $\Rightarrow$ $f_{ctm} = 0,3\left[f_{ck}\right]^{2/3}$ $\qquad$ $f_{ctm} = 0,3\left[25\right]^{2/3} = 2,56$ MPa

$\overline{\sigma_c} = k_1.f_{ck}$ $\qquad$ $\overline{\sigma_c} = 0,6.25 = 15$ MPa

1.2 Aciers

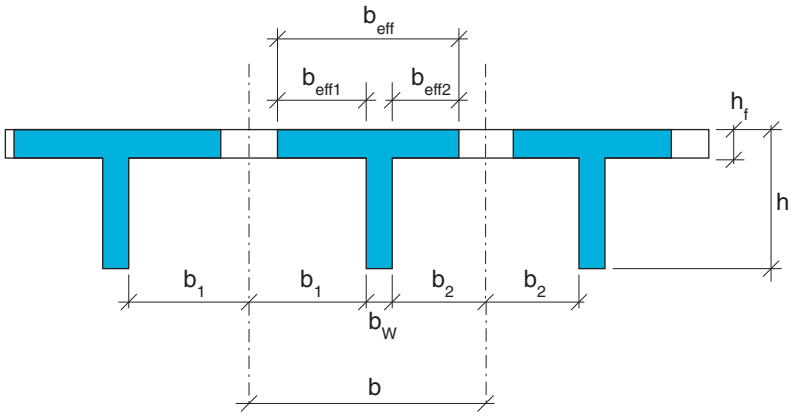
$f_{yd} = \dfrac{f_{yk}}{\gamma_s}$ $\qquad$ $f_{yd} = \dfrac{500}{1,15} = 435$ MPa

$\overline{\sigma_s} = k_3.f_{yk}$ $\qquad$ $\overline{\sigma_s} = 0,8.500 = 400$ MPa

2. Sollicitations de flexion

2.1 Largeur de table à prendre en compte

(voir § 2.2, chapitre 1 : « Analyse structurale », *Maîtriser l'eurocode 2*, J. Roux, Éditions Eyrolles, 2009)



l_0 = distance entre points de moments nuls $l_0 = l_{eff} = 15,00$ m

$b_i = \dfrac{b - b_w}{2}$ $\qquad$ $b_i = 1,125$ m $= \dfrac{(2,25 + 0,35) - 0,35}{2}$

$$b_{eff,\,i} = \text{Min}\begin{cases} 0,2.b_i + 0,10.l_0 \\ 0,2.l_0 \\ b_i \end{cases}$$

$$b_{eff,\,i} = 1,125\text{ m} = \text{Min}\begin{cases} 0,2.1,125 + 0,10.15,00 = 1,725\text{ m} \\ 0,2.15,00 = 3,00\text{ m} \\ 1,125\text{ m} \end{cases}$$

$$b_{eff} = \text{Min}\begin{cases} \sum b_{eff,\,i} + b_w \\ b \end{cases}$$

$$b_{eff} = 2,60\text{ m} = \text{Min}\begin{cases} 2.1,125 + 0,35 = 2,60\text{ m} \\ 2,60\text{ m} \end{cases}$$

2.2 État limite ultime de résistance

Actions au ml :

ϖ = poids volumique du béton armé $\quad \varpi = 25\text{ kN/m}^3$

$g = g_1 + \varpi\left[b.h_f + b_w\left(h - h_f\right)\right]$ $\quad g = 108,50 + 25\left[2,60.0,16 + 0,35(1,70 - 0,16)\right]$

$g = 132,38\text{ kN/m}$

$p_u = 1,35.g + 1,5.q$ $\quad p_u = 1,35.132,38 + 1,5.62$

$p_u = 271,71\text{ kN/m}$

Moment fléchissant maximal :

$$M_{Ed} = p_u \frac{l_{eff}^2}{8} \qquad M_{Ed} = 271,71\frac{15,00^2}{8}$$

$M_{Ed} = 7\,641,84\text{ mkN}$

2.3 État limite de service

Actions au ml :

$p_{ser} = g + q$ $\quad p_{ser} = 132,38 + 62$

$p_{ser} = 194,38\text{ kN/m}$

Moment fléchissant maximal :

$$M_{ser} = p_{ser} \frac{l_{eff}^2}{8} \qquad M_{ser} = 194,38\frac{15,00^2}{8}$$

$M_{ser} = 5\,466,94\text{ mkN}$

2.4 Coefficient γ

$$\gamma = \frac{M_{Ed}}{M_{ser}} \qquad \gamma = \frac{7\,641,84}{5\,466,94} = 1,40$$

3. calcul des armatures tendues à l'ELU dans le cas du diagramme σ–ε à palier horizontal

3.1 Moment de référence

La section considérée est une section en T.

Hauteur utile :

$d = 0,93.h$ $\qquad d = 0,93.1,70 = 1,58$ m

Moment de référence :

$$M_{Tu} = b_{eff}.h_f.f_{cu}\left(d - \frac{h_f}{2}\right)$$

$$M_{Tu} = 2,60.0,16.16,7\left(1,575 - \frac{0,16}{2}\right) = 10,421 \text{ mMN}$$

Type de section à considérer :

$M_{Ed} >< M_{Tu}$ $\qquad M_{Ed} = 7\,641,84$ mKN $< 10\,421$ mKN $= M_{Tu}$

La zone comprimée a une forme rectangulaire de largeur b_{eff}.

⇒ Le béton tendu étant négligé, calcul en section rectangulaire de largeur b_{eff}.

3.2 Armatures longitudinales

3.2.1 Nécessité d'aciers comprimés

$$\mu_{cu} = \frac{M_{Ed}}{b_w.d^2.f_{cu}} \text{ avec } b_w = b_{eff} \qquad \mu_{cu} = \frac{7,64184}{2,60.1,58^2.16,7} = 0,071$$

$$\Rightarrow \quad \alpha_u = \frac{1}{\lambda}\left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{bu}}\right] \qquad \alpha_u = \frac{1}{0,8}\left[1 - \sqrt{1 - 2.0,071}\right] = 0,092$$

$f_{ck} = 25$ MPa,
S 500 PH,
$\gamma = 1,40$,
σ_c limitée (classe XD).
$\Rightarrow \mu_{lu}(15)$ $\quad \mu_{lu}(15) = 0,2265$ (voir tableau du § 2.3.1 des rappels théoriques)

$$\mu_{lu}(\alpha_e) = \mu_{lu}(15).K$$

avec :

$$K = \left(A + B.\alpha_e + C.\alpha_e^2\right).10^{-4}$$

où :

$$\begin{cases} A = 71{,}2.f_{ck} + 108 \\ B = -5{,}2.f_{ck} + 847{,}4 \\ C = 0{,}03.f_{ck} - 12{,}5 \end{cases}$$

$$\alpha_e = 15 \Rightarrow \mu_{lu}(\alpha_e) = \mu_{lu}(15) = 0{,}2265$$

$\mu_{cu} >< \mu_{lu}$ $\qquad \mu_{cu} = 0{,}071 < 0{,}2265 = \mu_{lu} \Rightarrow \boxed{A_{s2} = 0}$

3.2.2 Armatures tendues

S 500 PH $\Rightarrow$ $\sigma_{s1} = f_{yd}$ $\qquad \sigma_{s1} = 435$ MPa

$$\Rightarrow z_c = d\left[1 - \frac{\lambda}{2}\alpha_u\right] \qquad z_c = 1{,}58\left[1 - \frac{0{,}8}{2}0{,}092\right] = 1{,}522 \text{ m}$$

$$\Rightarrow A_{s1,\,u} = \frac{M_{Ed}}{z_c.\sigma_{s1}} \qquad \boxed{A_{s1,\,u} = \frac{7{,}64184}{1{,}522.435}10^4 = 115{,}42 \text{ cm}^2}$$

3.2.3 Section minimale d'armatures

Maîtrise de la fissuration non requise $\Rightarrow$

$$f_{ct,\,eff} = f_{ctm,\,fl} = \text{Max}\begin{cases}\left(1{,}6 - \dfrac{h}{1\,000}\right)f_{ctm} \\ f_{ctm}\end{cases}$$

$$f_{ct,\,eff} = 2{,}56 \text{ MPa} = \text{Max}\begin{cases}\left(1{,}6 - \dfrac{1\,700}{1\,000}\right)2{,}56 = -0{,}26 \text{ MPa} \\ f_{ctm} = 2{,}56 \text{ MPa}\end{cases}$$

$$A_{s1} >< A_{s,\,min} = \text{Max}\begin{cases}0{,}26\dfrac{f_{ct,\,eff}}{f_{yk}}b_t.d \\ 0{,}0013.b_t.d\end{cases}$$

$$A_{s1} = 115{,}42 \text{ cm}^2 > 7{,}36 \text{ cm}^2 = A_{s,\,min} = \text{Max}\begin{cases}0{,}26\dfrac{2{,}56}{500}35.158 = 7{,}36 \text{ cm}^2 \\ 0{,}0013.35.158 = 7{,}19 \text{ cm}^2\end{cases} \text{ O.K.}$$

En prenant trois files verticales :

$$\boxed{15\,\phi\,32 \text{ HA} : 15.8{,}04 = 120{,}60 \text{ cm}^2}$$

Compte tenu du nombre important de barres nécessaires, nous en disposerons une partie dans un talon en partie basse de la poutre.

3.2.4 Dimensionnement du talon de la poutre

3.2.4.1 Enrobage minimal

Enrobage :

$$c_{min} = \text{Max}\begin{cases} c_{min,\ b}, \\ c_{min,\ dur} + \Delta c_{dur,\ \gamma} - \Delta c_{dur,\ st} - \Delta c_{dur,\ add}, \\ 10 \text{ mm}. \end{cases}$$

$c_{min,\ b}$ requis vis-à-vis de l'adhérence :

barres individuelles : $c_{min,\ b} = \phi = 32$ mm

$c_{min,\ dur}$ requis vis-à-vis des conditions d'environnement :

$$\left.\begin{array}{l}\text{classe structurale} \\ \text{classe d'environnement}\end{array}\right\} \Rightarrow c_{min,\ dur}$$

$$\left.\begin{array}{l}\text{classe structurale : S4} \\ \text{classe d'environnement : XD2}\end{array}\right\} \Rightarrow c_{min,\ dur} = 40 \text{ mm}$$

Marge de sécurité :

$\Delta c_{dur,\ \gamma}$ $\Delta c_{dur,\ \gamma} = 0$ mm

Enrobage minimal dans le cas d'acier inoxydable :

Aciers normaux : $\Delta c_{dur,\ st} = 0$ mm

Enrobage minimal dans le cas de protection supplémentaire :

Pas de protection particulière : $\Delta c_{dur,\ add} = 0$ mm

Total :

$$c_{min} = 40 \text{ mm} = \text{Max}\begin{cases} 32 \text{ mm} \\ 40 + 0 - 0 - 0 = 40 \text{ mm} \\ 10 \text{ mm}. \end{cases}$$

3.2.4.2 Enrobage nominal

Marge pour tolérances d'exécution :

Δc_{dev} $\Delta c_{dev} = 10$ mm

Enrobage nominal :

$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$ $c_{nom} = 40 + 10 = 50$ mm

3.2.4.3 Distance entre barres

Distance libre horizontale ou verticale :

$$a \geq \text{Max}\begin{cases} k_1.\phi \\ 20 \text{ mm} \\ d_g + k_2 \text{ mm} \end{cases}$$

avec :

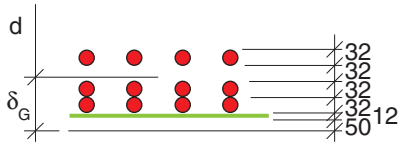
$k_1 = 1$ et $k_2 = 5$ mm : valeurs recommandées

$$a \geq 32 \text{ mm} = \text{Max} \begin{cases} 1.32 = 32 \text{ mm} \\ 20 \text{ mm} \\ 25 + 5 = 30 \text{ mm} \end{cases}$$

3.2.4.4 Vérifications

Hauteur utile :

Pour 3 barres par file verticale et des armatures transversales ϕ 12 mm $\left(\phi_t \approx \phi_l / 3\right)$:



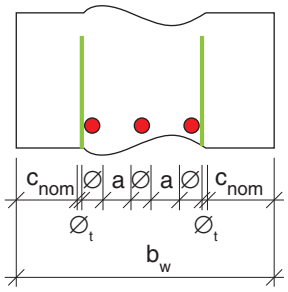
$$\delta_G = \frac{\left(50 + 12 + \frac{32}{2}\right) + \left(50 + 12 + 32 + \frac{32}{2}\right) + \left(50 + 12 + 3.32 + \frac{32}{2}\right)}{3}$$

$$\delta_G = 120{,}7 \text{ mm}$$

$d = h - \delta_G$ $\qquad$ $\boxed{d = 170 - 12{,}07 = 157{,}93 \text{ cm} \approx 158 \text{ cm O.K.}}$

Distances entre barres :

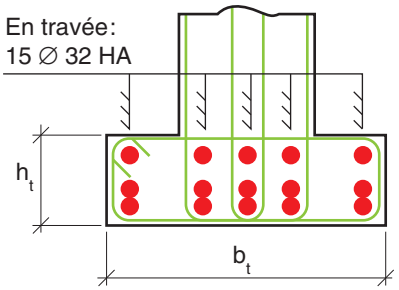
Dans l'âme de la poutre, pour trois files verticales :



$b_w >< 2.c_{nom} + 3.\phi + 2.\phi_t + 2.a$

$\boxed{b_w = 350 \text{ mm} > 284 \text{ mm} = 2.50 + 3.32 + 2.12 + 2.32 \text{ O.K.}}$

3.2.4.5 Dimensionnement du talon



Hauteur :

$h_t > 2.c_{nom} + 2.\phi_t + 3.\phi + a$ $\quad h_t > 2.50 + 2.12 + 3.32 + 32 = 252$ mm

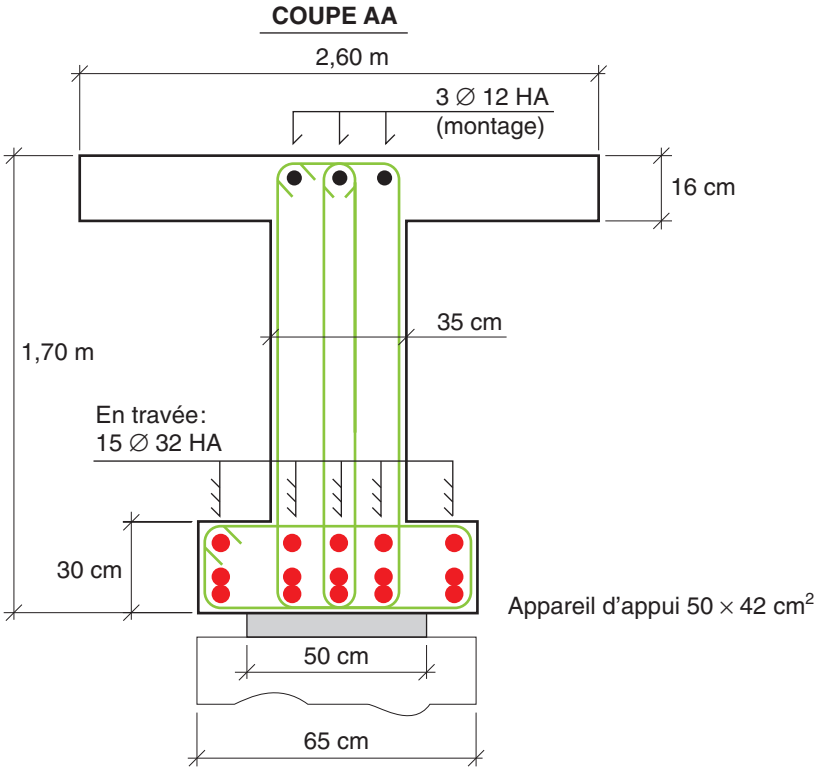
$\Rightarrow$ retenons $h_t = 30$ cm.

Largeur :

$b_t > 2.c_{nom} + 6.\phi_t + 5.\phi + 4.a$ $\quad b_t > 2.50 + 6.12 + 5.32 + 4.32 = 460$ mm

$\Rightarrow$ retenons $b_t = 65$ cm.

3.2.5 Retenu



4. Vérification des contraintes à l'ELS dans la section fissurée

Pour la section d'armatures réelles : $A_{s1} = A_{s1,\ prov} = 120,60\ cm^2$

4.1 Type de section à considérer

$$f(h_f) = \frac{b_{eff}.h_f^2}{2} + \alpha_e.A_{s2}(h_f - d') - \alpha_e.A_{s1}(d - h_f)$$

$$f(h_f) = \frac{260.16^2}{2} - 15.120,60(158 - 16) = -223\ 598$$

$f(h_f) >< 0 \quad \Rightarrow$ Type de section à considérer :

$f(h_f) = -223\ 598 < 0 \quad \Rightarrow$ Section en T

4.2 Position de l'axe neutre

$$\frac{b_w.x_1^2}{2} + \left[(b_{eff} - b_w)h_f + \alpha_e(A_{s1} + A_{s2})\right]x_1 - \left[(b_{eff} - b_w)\frac{h_f^2}{2} + \alpha_e(A_{s1}.d + A_{s2}.d')\right] = 0$$

$$\frac{35.x_1^2}{2} + \left[(260 - 35).16 + 15.120,60\right]x_1 - \left[(260 - 35)\frac{16^2}{2} + 15.120,60.158\right] = 0$$

$$17,5.x_1^2 + 5\ 409.x_1 - 314\ 622 = 0$$

$$\Delta = 5\ 409^2 + 4.17,5.314\ 622 = 7\ 161,06^2$$

$$x_1 = \frac{-5\ 409 + 7\ 161,06}{2.17,5} = 50,06\ cm > 16\ cm = h_f$$

4.3 Moment d'inertie de la section fissurée

$$I_{cf} = \frac{b_{eff}.x_1^3}{3} - (b_{eff} - b_w)\frac{(x_1 - h_f)^3}{3} + \alpha_e.A_{s2}(x_1 - d')^2 + \alpha_e.A_{s1}(d - x_1)^2$$

$$I_{cf} = \frac{260.50,06^3}{3} - (260 - 35)\frac{(50,06 - 16)^3}{3} + 15.120,60.(158 - 50,06)^2$$

$$I_{cf} = 28\ 985\ 684\ cm^4$$

4.4 Contraintes

$$K = \frac{M_{ser}}{I_{cf}} \qquad K = \frac{5\ 466,94.10^{-3}}{28\ 985\ 684.10^{-8}} = 18,86\ MN/m^3$$

Classe d'exposition XD2 $\Rightarrow \quad \sigma_c = K.x_1 >< \overline{\sigma_c}$

$$\boxed{\sigma_c = 18{,}86.0{,}5006 = 9{,}44 \text{ MPa} < 15 \text{ MPa} = \overline{\sigma_c} \text{ O.K.}}$$

$$\sigma_{s1} = \alpha_e . K \left(d - x_1 \right) >< \overline{\sigma_s}$$

$$\boxed{\sigma_{s1} = 15.18{,}86\ (1{,}58 - 0{,}5006) = 305 \text{ MPa} < 400 \text{ MPa} \text{ O.K.}}$$

$$\frac{\sigma_{s1}}{f_{yk}} \qquad \frac{\sigma_{s1}}{f_{yk}} = \frac{305}{500} = 0{,}61 < 0{,}8 = k_3$$

8 Effort tranchant

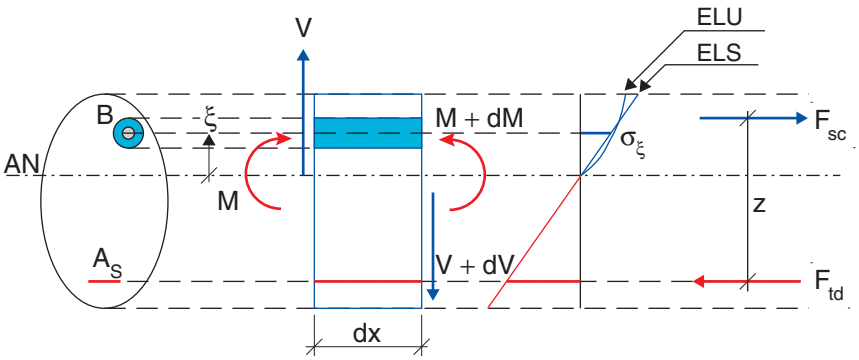
I. RAPPELS THÉORIQUES

1. Contraintes engendrées par l'effort tranchant

1.1 Introduction

1.1.1 Effort de glissement

On considère une aire homogène quelconque B idéalement découpée dans la section droite d'une poutre à plan moyen soumise à la flexion simple.



Section droite — Tronçon de poutre — Diagramme des contraintes — Forces internes

La contrainte normale à l'ELS à la distance x de l'axe neutre vaut :

$$\sigma_\xi = \frac{M}{I_1}\xi$$

I_1 = moment d'inertie par rapport à l'axe neutre de la section homogène réduite (béton comprimé et armatures).

Résultante des forces élastiques agissant sur l'aire homogène B idéalement découpée dans la section droite :

$$F_B = \int_B \sigma_\xi .dB = \frac{M}{I_1}\int_B \xi .dB = \frac{M}{I_1} S_B$$

S_B = moment statique par rapport à l'axe neutre de l'aire homogène B.

Si V n'est pas nul entre deux sections droites distantes de dx :

- M varie de dM,
- donc F_B varie de dF_B.

On appelle effort de glissement par unité de longueur de poutre la quantité :

$$g = \frac{dF_B}{dx} = \frac{dM}{dx} \cdot \frac{S_B}{I_1}$$

Or, $V = \frac{dM}{dx}$

d'où :

$$\boxed{g = \frac{V}{I_1} S_B}$$

1.1.2 Contraintes tangentes

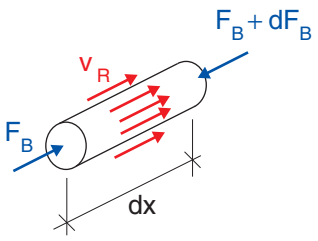
Sous l'effet de g, le prisme B.dx a tendance à se déplacer par rapport à la poutre, le long d'une surface de glissement dont la trace sur le plan de la section droite de la poutre a pour longueur u.

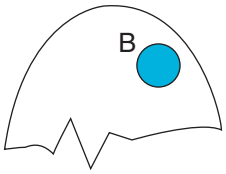
L'équilibre du prisme de base B et de longueur dx est assuré par des contraintes tangentes qui se développent sur la surface de glissement du prisme B.dx par rapport à la poutre.

En posant :

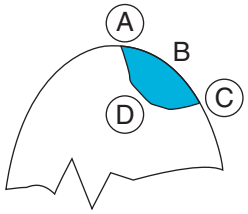
v_R = valeur, supposée constante, de la contrainte tangente en tout point de la surface latérale du prisme,

u = longueur de la trace de la surface de glissement sur le plan de la section droite de la poutre,





u = périmètre de B



Trace de la surface de glissement

$u = \overset{\frown}{ADC}$

l'équilibre du prisme B.dx suivant son axe s'écrit :

$$v_R . u . dx = dF_B \quad \Rightarrow \quad v_R = \frac{1}{u} . \frac{dF_B}{dx} = \frac{g}{u}$$

soit :

$$\boxed{v_R = \frac{V}{I_1}.\frac{S_B}{u}}$$

1.1.3 Bras de levier des forces élastiques

En prenant la zone comprimée homogène de la section comme aire B (F_{sc} = résultante des compressions sur cette zone) :

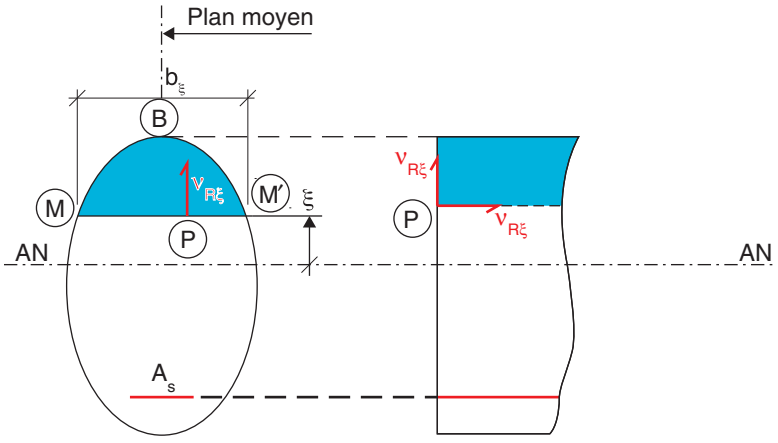
$$\left.\begin{aligned} F_B &= \frac{M}{I_1}S_B \\ F_B &= F_{sc} \\ M &= F_{sc}.z \end{aligned}\right\} \Rightarrow \left\{\begin{aligned} F_{sc} &= \frac{M}{I_1}S_B \\ F_{sc} &= \frac{M}{z} \end{aligned}\right. \Rightarrow z = \frac{I_1}{S_B} \text{ par identification.}$$

D'où, en posant $S_B = S_1$:

$$\boxed{z = \frac{I_1}{S_1}}$$

S_1 = moment statique par rapport à l'axe neutre de la zone comprimée homogène de la section.

1.2 Contraintes tangentes sur un plan perpendiculaire au plan moyen



En considérant la zone comprimée de la section située au-dessus du plan de tracé MM' = b_ξ, perpendiculaire au plan moyen, à la cote ξ au dessus de l'axe neutre, on a :

- un effort de glissement :

$$g_\xi = \frac{V}{I_1} S_{1\xi}$$

- une contrainte tangente :

$$v_{R\xi} = \frac{V}{I_1} \cdot \frac{S_{1\xi}}{b_\xi}$$

en désignant par $S_{1\xi}$ le moment statique, par rapport à l'axe neutre, de l'aire MBM' rendue homogène.

Comme $z = I_1/S_1$, il vient :

$$\begin{cases} g_\xi = \dfrac{V}{z} \cdot \dfrac{S_{1\xi}}{S_1} \\ v_{R\xi} = \dfrac{V}{z} \cdot \dfrac{S_{1\xi}}{S_1} \cdot \dfrac{1}{b_\xi} \end{cases}$$

En vertu du théorème de Cauchy (RdM), la contrainte tangente en tout point P du plan de tracé MM' s'exerce à la fois :

- dans ce plan ;
- et dans le plan de la section droite.

Au-dessous de l'axe neutre, comme on néglige le béton tendu, on a :

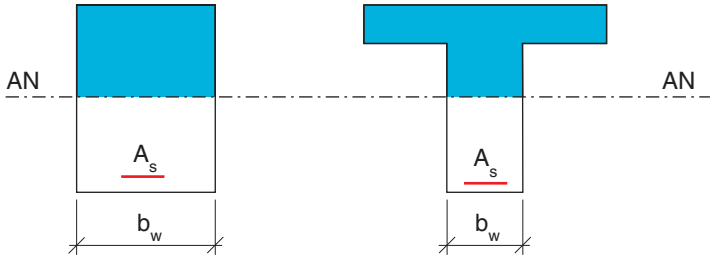
$S_{1\xi} = S_1$ quel que soit x,

d'où, entre l'axe neutre et les armatures tendues :

$$\boxed{\begin{cases} g_\xi = g_{max} = \dfrac{V}{z} = \text{Cste} \\ v_{R\xi} = \dfrac{V}{z} \cdot \dfrac{1}{b_\xi} \end{cases}}$$

La valeur maximale v_R de $v_{R\xi}$ s'obtient pour la valeur minimale de b_ξ dans la zone tendue.

Pour une section rectangulaire ou en T, au-dessous de l'axe neutre, on a toujours :



$b_{\xi\,min} = b_w = Cste$

d'où :

$$v_{R\xi} = v_R = \frac{V}{b_w.z}$$

on encore, en admettant que $z \approx 0,9.d$:

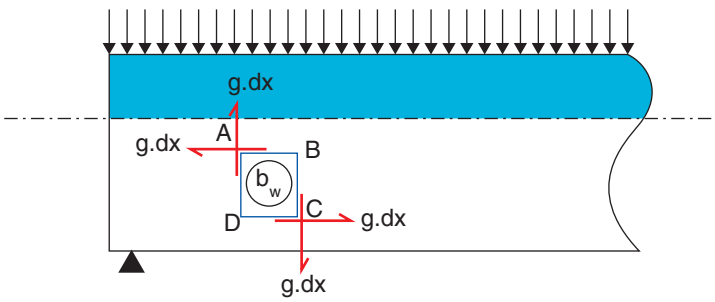
$$v_R = \frac{V}{0,9.b_w.d}$$

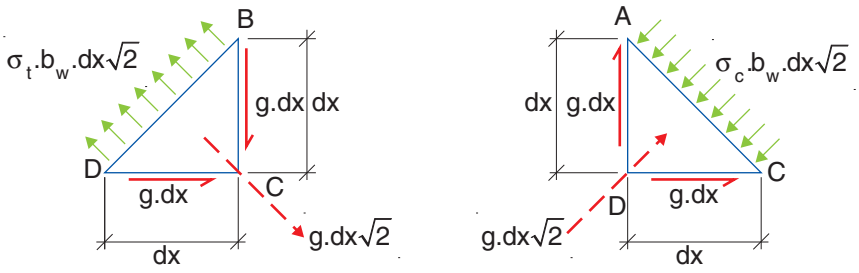
1.3 Effet des contraintes tangentes

Au-dessous de l'axe neutre, un prisme de base carrée ABCD :

- de côté AB = dx, parallèle à la ligne moyenne ;
- de hauteur b_w ;

est soumis dans le plan de ses quatre faces uniquement à des efforts de glissement g.dx (puisque le béton tendu est négligé).





Sur l'élément plan de trace BD, d'aire $b_w dx\sqrt{2}$, s'exercent :

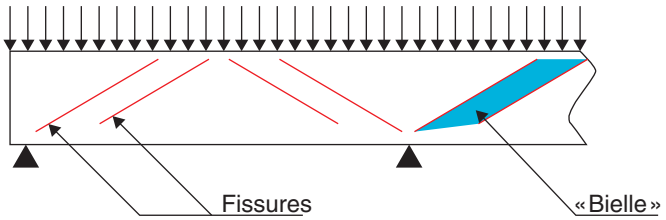
- un effort de traction : $g.dx\sqrt{2}$;
- donc une contrainte de traction :

$$\sigma_t = \frac{g.dx\sqrt{2}}{b_w.dx\sqrt{2}} = \frac{g}{b_w} = \frac{V}{b_w.z} = v_R \ .$$

De la même manière, l'élément plan de trace AC est soumis à une contrainte de compression :

$\sigma_c = v_R$

Conséquences au voisinage des appuis :



1/ V élevé $\Rightarrow$ v_R élevé $\Rightarrow$ σ_t élevé $\Rightarrow$ risque de fissuration à 45° ;

2/ risque d'écrasement du béton suivant les « bielles » de béton à 45°, découpées par les fissures et soumises à $\sigma_c = v_R$.

Il faut donc :

1/ limiter v_R pour limiter la compression des bielles.

2/ coudre les fissures obliques par des armatures dites armatures d'effort tranchant ou armatures d'âme.

Lorsque les fissures obliques se sont produites, la conclusion précédente ($\sigma_t = \sigma_c = v_R$) n'est plus valable. Il y a redistribution des efforts entre :

- les armatures d'âme tendues, d'une part ;
- les bielles de béton comprimé, d'autre part.

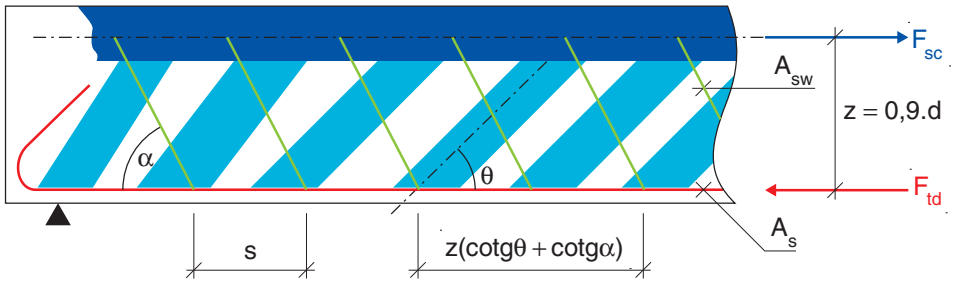
2. Équations pour le calcul des armatures d'effort tranchant

2.1 Théorie du treillis de Mörsch

2.1.1 Introduction

Une poutre de section constante, dont l'âme est « fissurée avec un angle θ », peut être assimilée à une poutre triangulée définie comme suit :

- membrure tendue = armatures longitudinales tendues ;
- membrure comprimée = zone comprimée de la poutre (béton et armatures longitudinales comprimées éventuelles) ;
- hauteur = distance entre les résultantes des efforts normaux dans les deux membrures (bras de levier $z \approx 0{,}9.d$) ;
- éléments comprimés = bielles de béton inclinées d'un angle θ sur la ligne moyenne ;
- éléments tendus = armatures d'âme :
  - inclinées d'un angle α sur la ligne moyenne ;
  - section A_{sw} par nappe ;
  - espacement s mesuré parallèlement à la ligne moyenne.



2.1.2 Règle des coutures généralisée

Tout plan P soumis à un effort de glissement ultime g par unité de longueur doit être traversé par des « armatures de couture » :

- inclinées en sens inverse de la fissuration probable ;
- totalement ancrées de part et d'autre de ce plan.

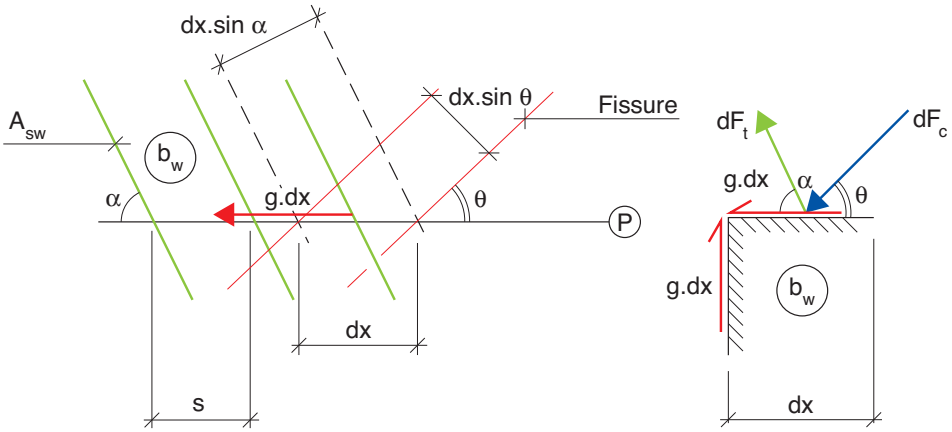
Considérons, dans le plan P à coudre, un élément plan de largeur b_w :

- perpendiculaire au plan moyen ;
- parallèle à la ligne moyenne.

Il est soumis à un effort de glissement longitudinal g.dx dans le plan P.

Cet effort doit être équilibré par :

- une force de compression dF_c, inclinée d'un angle θ sur P (compression des bielles de béton) ;
- une force de traction dF_t, inclinée d'un angle α sur P (traction des armatures de couture).



Par projection des forces sur P et sur la normale à P, il vient :

$$\begin{cases} dF_t.\cos\alpha + dF_c.\cos\theta = g.dx & [8.1] \\ -dF_t.\sin\alpha + dF_c.\sin\theta = 0 & [8.2] \end{cases}$$

Nous en déduisons :

$$\begin{cases} [8.1].\sin\alpha + [8.2].\cos\alpha \Rightarrow dF_c\left[\cos\theta.\sin\alpha + \sin\theta.\cos\alpha\right] = g.dx.\sin\alpha \\ [8.1].\sin\theta - [8.2].\cos\theta \Rightarrow dF_t\left[\cos\alpha.\sin\theta + \sin\alpha.\cos\theta\right] = g.dx.\sin\theta \end{cases}$$

D'où les efforts sur l'élément plan :

$$\begin{cases} dF_c = \dfrac{g.dx.\sin\alpha}{\cos\theta.\sin\alpha + \sin\theta.\cos\alpha} \\ dF_t = \dfrac{g.dx.\sin\theta}{\cos\alpha.\sin\theta + \sin\alpha.\cos\theta} \end{cases}$$

En fonction des contraintes, ces efforts ont pour expression :

$dF_c = \sigma_c.b_w.dx.\sin\theta$ pour la bielle de béton comprimée,

$$dF_t = \frac{A_{sw}}{s}.\sigma_{sw}.dx = \frac{A_{sw}}{s.b_w.\sin\alpha}.\sigma_{sw}.b_w.dx.\sin\alpha = \rho_w.\sigma_{sw}.b_w.dx.\sin\alpha$$

pour les armatures de couture tenues,
avec :

$\boxed{\rho_w = \dfrac{A_{sw}}{s.b_w.\sin\alpha}}$ = pourcentage d'armatures de couture,

A_{sw} = section d'un cours d'armatures de couture,

s = espacement de ces armatures.

On en déduit les contraintes ($g = v_R.b_w$) :

$$\begin{cases} \sigma_c.b_w.dx.\sin\theta = \dfrac{v_R.b_w.dx.\sin\alpha}{\cos\theta.\sin\alpha + \sin\theta.\cos\alpha} \\ \rho_w.\sigma_{sw}.b_w.dx.\sin\alpha = \dfrac{v_R.b_w.dx.\sin\theta}{\cos\alpha.\sin\theta + \sin\alpha.\cos\theta} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_c = \dfrac{v_R.\sin\alpha}{\sin\theta.\cos\theta.\sin\alpha + \sin^2\theta.\cos\alpha} \\ \rho_w.\sigma_{sw} = \dfrac{v_R.\sin\theta}{\sin\alpha.\cos\alpha.\sin\theta + \sin^2\alpha.\cos\theta} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_c = \dfrac{v_R}{\sin^2\theta\left(\mathrm{cotg}\theta + \mathrm{cotg}\alpha\right)} \\ \rho_w.\sigma_{sw} = \dfrac{v_R}{\sin^2\alpha\left(\mathrm{cotg}\theta + \mathrm{cotg}\alpha\right)} \end{cases} \qquad [8.3]$$

2.1.3 État limite ultime par écrasement des bielles de béton

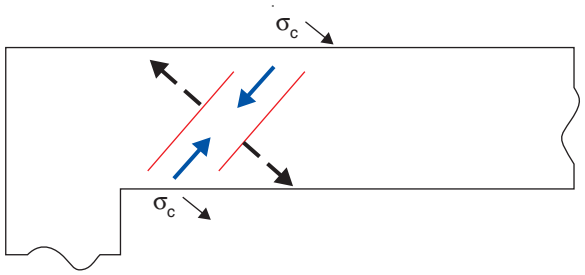
La contrainte des armatures d'effort tranchant ne peut atteindre la résistance $f_{ywd} = \dfrac{f_{ywk}}{\gamma_s}$ que si la résistance à la compression des bielles de béton n'est pas dépassée, c'est-à-dire que si[1] :

$$\sigma_c \le \nu_1 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \nu_1.f_{cd} \qquad [8.4]$$

ν_1 = coefficient d'« efficacité » déterminé expérimentalement.

Le coefficient ν_1 est au plus égal à 1 du fait que les bielles de béton ne sont pas simplement comprimées, mais sont soumises à des efforts de traction transversaux provoqués par la mise en traction de l'âme ce qui a pour effet de diminuer leur résistance à la compression (essais de J.R. Robinson) :

1. EC 2 – 6.2.3 (4)



L'état limite est atteint par écrasement des bielles de béton comprimées lorsque l'effort tranchant atteint la valeur :

$$v_R = \frac{V_{Rd,\,max}}{b_w.z} \quad \Rightarrow \quad V_{Rd,\,max} = v_R.b_w.z = \sigma_c \sin^2\theta(\cot g\theta + \cot g\alpha)b_w.z$$

soit, compte tenu de la limitation de σ_c :

$$V_{Rd,\,max} = \nu_1.f_{cd}.\underbrace{\sin^2\theta}_{\frac{1}{1+\cot g^2\theta}}.(\cot g\theta + \cot g\alpha).(b_w.z)$$

$$\boxed{V_{Rd,\,max} = \nu_1.f_{cd}(b_w.z)\frac{\cot g\theta + \cot g\alpha}{1+\cot g^2\theta}} \qquad [8.5]$$

Remarque

Dans le cas de structures précontraintes, cette formule est corrigée à l'aide d'un coefficient multiplicateur α_{cw} fonction de l'intensité de la contrainte de compression due à la précontrainte.

2.1.4 État limite ultime par traction excessive des armatures d'âme

Si l'effort tranchant est au plus égal à $V_{Rd,\,max}$, la contrainte σ_{sw} peut atteindre f_{ywd}, de sorte que la borne de l'effort tranchant – $V_{Rd,\,s}$ – qui définit l'état limite ultime atteint par traction excessive des armatures d'âme est obtenue par la seconde formule [8.3] avec $v_R = \frac{V_{Rd,\,s}}{b_w.z}$:

$$\boxed{V_{Rd,\,s} = \left(\rho_w.f_{ywd}.\sin^2\alpha\right).\left(\cot g\theta + \cot g\alpha\right).\left(b_w.z\right)} \qquad [8.6]$$

L'équation [8.1] s'écrit :

$$\underbrace{\rho_w.\overbrace{\sigma_{sw}}^{f_{ywd}}.b_w dx.\sin\alpha}_{dF_t}.\cos\alpha + \underbrace{\overbrace{\sigma_c}^{\nu_1.f_{cd}}.b_w dx.\sin\theta}_{dF_c}.\cos\theta = \underbrace{v_R.b_w}_{g}.dx$$

$$\frac{v_R}{\nu_1.f_{cd}} = \frac{\rho_w.f_{ywd}}{\nu_1.f_{cd}} \sin\alpha.\cos\alpha + \sin\theta.\cos\theta$$

soit en posant :

$$\psi = \frac{\rho_w.f_{ywd}}{\nu_1.f_{cd}} \qquad [8.7]$$

$$\psi' = \psi.\sin^2\alpha$$

$$\frac{v_R}{\nu_1.f_{cd}} = \psi'.\cot g\alpha + \sin\theta.\cos\theta \qquad [8.8]$$

De la même manière, l'équation [8.2] s'écrit :

$$-\underbrace{\rho_w.f_{ywd}.b_w dx.\sin\alpha}_{dF_t}.\sin\alpha + \underbrace{\nu_1.f_{cd}.b_w dx.\sin\theta}_{dF_c}.\sin\theta = 0$$

$$\sin^2\theta = \frac{\rho_w.f_{ywd}}{\nu_1.f_{cd}}\sin^2\alpha = \psi'$$

et l'équation [8.8] devient :

$$\frac{v_R}{\nu_1.f_{cd}} = \psi'.\cot g\alpha + \sin\theta\sqrt{1-\sin^2\theta} = \psi'.\cot g\alpha + \sqrt{\psi'(1-\psi')} \qquad [8.9]$$

La dérivée du second membre par rapport à ψ' vaut :

$$\frac{d\left(\frac{v_R}{\nu_1.f_{cd}}\right)}{d\psi'} = \cot g\alpha + \frac{1}{2}(1-2.\psi')\frac{1}{\sqrt{\psi'(1-\psi')}} = \frac{\sqrt{\psi'(1-\psi')}\cot g\alpha + \frac{1}{2} - \psi'}{\sqrt{\psi'(1-\psi')}}$$

elle s'annule pour :

$$\psi'(1-\psi') = \frac{\left(\psi' - \frac{1}{2}\right)^2}{\cot g^2\alpha} \qquad \Leftrightarrow \psi'\cot g^2\alpha - \psi'^2\cot g^2\alpha = \psi'^2 - \psi' + \frac{1}{4}$$

$$\psi'^2\underbrace{1+\cot g^2\alpha}_{\frac{1}{\sin^2\alpha}} - \psi'\underbrace{1+\cot g^2\alpha}_{\frac{1}{\sin^2\alpha}} + \frac{1}{4} = 0$$

$$\psi'^2 - \psi' + \frac{\sin^2\alpha}{4} = 0$$

$$\Rightarrow \quad \Delta = 1 - \sin^2\alpha = \cos^2\alpha$$

$$\Rightarrow \quad \psi' = \frac{1+\cos\alpha}{2} \quad (+ \text{ pour } \psi'_{max} \quad \Rightarrow \quad \rho_{w,max} \text{ d'après [8.7]})$$

$$\text{D'où : } \psi = \frac{\psi'}{\sin^2\alpha} = \frac{\psi'}{1-\cos^2\alpha} = \frac{1}{2(1-\cos\alpha)} = \frac{\rho_w.f_{ywd}}{\nu_1.f_{cd}}$$

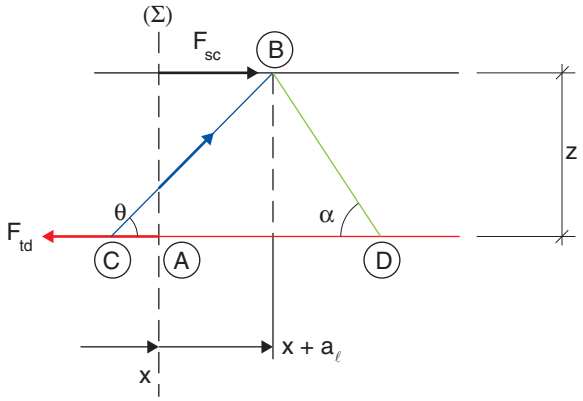
$$\Rightarrow \left(\frac{A_{sw}.f_{ywd}}{s.b_w}\right)_{max} = \frac{\nu_1.f_{cd}.\sin\alpha}{2(1-\cos\alpha)} \qquad [8.10]$$

Ces deux valeurs de ψ ou ψ', rendent maximal le rapport $\frac{\rho_w.f_{ywd}}{\nu_1.f_{cd}}$. Une augmentation de l'une ou de l'autre – c'est-à-dire du pourcentage ρ_w d'armatures d'effort tranchant – ne permet pas de franchir ce maximum, qui définit donc lui-même une borne supérieure de ρ_w.

2.1.5 Règle du décalage

Par suite de la fissuration oblique, l'effort de traction supporté par une armature tendue dans une section A d'abscisse x correspond au moment dans une section B d'abscisse $x + a_1$.

Ce résultat est évident pour un treillis simple :

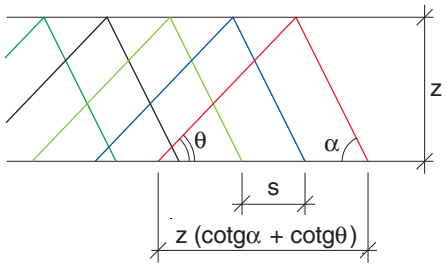


$$M_B = M(x + a_1) = F_{td}.z \quad \Rightarrow \quad F_{td} = \frac{M(x+a_1)}{z} \neq \frac{M(x)}{z} = \frac{M_A}{z}$$

Dans un treillis multiple de Mörsch, l'effort dans la membrure tendue, en un point A d'abscisse x, est la somme des efforts développés dans les membrures des diverses poutres à treillis simples constituant ce treillis multiple en ce point.

L'ordre de la triangulation (c'est-à-dire le nombre de treillis simples superposés) est égal au nombre de cours d'armatures d'âme rencontrés par une même parallèle aux diagonales comprimées :

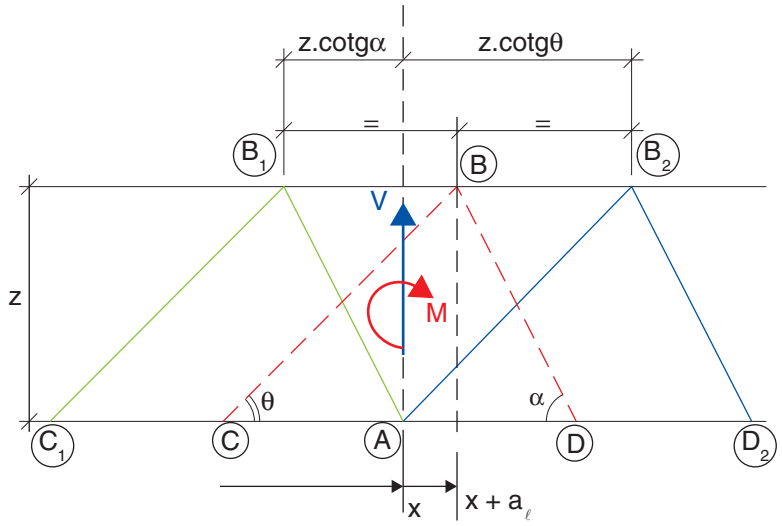
$$n = z\,\frac{\cot g\alpha + \cot g\theta}{s}$$



L'effort de traction élémentaire dans la membrure tendue d'un treillis simple vaut :

$$F_{td} = \frac{1}{n}.\frac{M_B}{z}$$

Pour le treillis multiple, l'effort de traction au point A de la membrure tendue est égal à la somme des efforts de traction élémentaires de tous les treillis simples compris entre les treillis élémentaires B_1C_1A et B_2AD_2 :



$$F_{td} = \sum_{B=B_1}^{B=B_2} \frac{M_B}{n.z}$$

En admettant que l'effort tranchant est constant autour de x, le moment fléchissant varie linéairement en fonction de l'abscisse. Les termes de la somme des efforts de traction élémentaires sont alors en progression arithmétique et cette somme est égale à n fois la valeur de son terme moyen qui se calcule à l'abscisse du milieu du segment B_1B_2 :

$$x + a_1 = x + z.\cot g\theta - \frac{z\left(\cot g\theta + \cot g\alpha\right)}{2} = x + \frac{z\left(\cot g\theta - \cot g\alpha\right)}{2}$$

D'où l'effort de traction supporté par l'armature tendue dans la section A d'abscisse x :

$$\left.\begin{array}{l} F_{td} = \dfrac{M(x + a_1)}{z} \\ M(x + a_1) = M(x) + V.a_1 \end{array}\right\} \Rightarrow \quad F_{td} = \frac{M(x)}{z} + V\frac{a_1}{z}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{F_{td} = \frac{M(x)}{z} + \frac{1}{2}V\left(\cot g\theta - \cot g\alpha\right)}$$

Remarque 1

Pour $\theta = 45^\circ$ et $z = 0{,}9.d$:

$$a_l = \frac{0{,}9.d\left(1 - \cot g\alpha\right)}{2}$$

Remarque 2

Pour $\theta = 45^\circ$, $\alpha = 90^\circ$ et $z = 0{,}9.d$:

$$\boxed{a_l = 0{,}45.d = \frac{z}{2}}$$

Le décalage a_l varie de $1{,}25.z$ à $\dfrac{z}{2}$ (pour $21{,}8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$).

2.2 Efforts tranchants de référence

D'après ce qui précède, on définit[2] :

V_{Ed} = effort tranchant de calcul à l'ELU, dû aux charges appliquées, dans la section considérée (axe d'appui, nu d'appui ou à la distance d du nu d'appui comme indiqué au § 2.3),

$V_{Rd,\,c}$ = effort tranchant résistant de calcul d'un élément sans armatures d'effort tranchant,

$V_{Rd,\,max}$ = effort tranchant de calcul maximal pouvant être supporté par l'élément sans provoquer l'écrasement des bielles de béton comprimé,

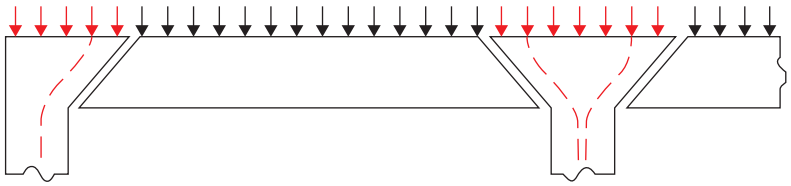
$V_{Rd,\,s}$ = effort tranchant de calcul pouvant être repris par les armatures d'effort tranchant travaillant à la limite d'élasticité.

2. EC 2 – 6.2.1 (1)P

2.3 Prise en compte des phénomènes de transmission directe des charges aux appuis

2.3.1 Cas des charges réparties

Pour tenir compte de la transmission directe des charges aux appuis, pour le calcul des armatures d'âme dans le cas de charges réparties, les efforts tranchants sont calculés, comme indiqué ci-dessous[3].



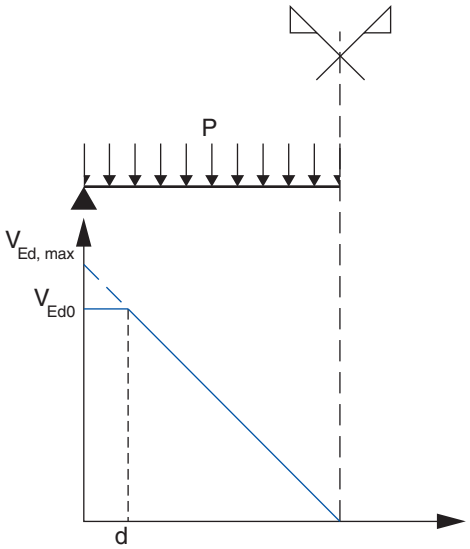
: charge transmise directement aux appuis

Pour des éléments soumis principalement à des charges réparties, l'effort tranchant réduit pour transmission directe de charges aux appuis est calculé à la distance d du nu d'appui :

$$V_{Ed0} = V_{Ed,\ max} - p.d$$

avec :

$V_{Ed,\ max}$ = effort tranchant au nu d'appui.



Les armatures d'âme, déterminées pour l'effort tranchant réduit V_{Ed0}, doivent être disposées à partir du nu d'appui.

La vérification de la compression des bielles doit être faite sans tenir compte de la transmission directe des charges aux appuis.

3. EC 2 – 6.2.1 (8)

2.3.2 Cas des charges concentrées

Pour les charges concentrées au voisinage des appuis vérifiant les conditions suivantes :

- la distance de leur point d'application au nu d'appui vérifie $0,5.d \le a_v < 2.d$[4] ;
- les charges sont appliquées à la face supérieure de l'élément[5] ;
- les armatures longitudinales sont totalement ancrées au-delà du nu d'appui ;

la valeur de l'effort tranchant développé par ces charges est minorée par :

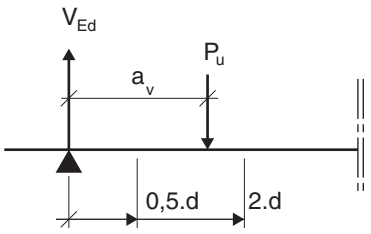
$$\beta = \text{Max}\begin{cases}\dfrac{a_v}{2.d}\\[2mm] \dfrac{1}{4}\end{cases}$$

$$\text{d'où : } V'_{Ed0} = \begin{cases} V_{Ed0}(p_u) + \beta.V_{Ed}(P_u) : \text{prédominance des charges réparties}\\ \text{ou}\\ V_{Ed}(p_u) + \beta.V_{Ed}(P_u) : \text{sinon}\end{cases}$$

avec :

$V_{Ed}(P_u)$ = effort tranchant développé par la charge concentrée dans la section considérée (à la distance d du nu d'appui ou au nu d'appui selon le cas).

Il revient au même de prendre pour valeur de ces charges concentrées :



$$P_u = \begin{cases}\dfrac{P_u}{4} \text{ si } a_v \le 0,5.d\\[2mm] \dfrac{a_v}{2.d}P_u \text{ si } 0,5.d < a_v \le 2.d\end{cases}$$

La vérification de la compression des bielles doit être faite sans tenir compte de la transmission directe des charges aux appuis.

4. EC 2 – 6.2.2 (6)
5. EC 2 – 6.2.3 (8)

3. Éléments pour lesquels aucune armature d'effort tranchant n'est requise

3.1 Éléments non concernés

Il n'est pas nécessaire de prévoir des armatures d'effort tranchant dans les éléments pour lesquels une distribution transversale des charges est possible (dalles pleines, nervurées ou alvéolées[6]).

Il n'est pas nécessaire de prévoir des armatures d'effort tranchant dans les éléments de faible importance qui ne contribuent pas de manière significative à la résistance et à la stabilité de l'ouvrage (cas des linteaux de portée inférieure à 2,00 m par exemple)[7].

3.2 Valeur des efforts tranchants de référence

3.2.1 Calcul de $V_{Rd,\,c}$

La formule qui donne $V_{Rd,\,c}$ d'origine expérimentale, comporte de nombreux paramètres[8] :

- pourcentage d'armatures longitudinales (ρ_l) ;
- présence d'un effort normal s'exerçant sur la section (σ_{cp}) ;
- ancrage des armatures longitudinales au-delà de la section.

Effort tranchant résistant de calcul d'un élément sans armatures d'effort tranchant :]

$$V_{Rd,\,c} = \text{Max}\begin{cases}\left[C_{Rd,\,c}.k.\sqrt[3]{100.\rho_l.f_{ck}} + k_1.\sigma_{cp}\right] b_w.d = V_{Rd,\,c1} & \textbf{(6.2a)}\\ \left[v_{min} + k_1.\sigma_{cp}\right] b_w.d = V_{Rd,\,c2} & \textbf{(6.2b)}\end{cases} \qquad [8.11]$$

(MN, MPa, m)

avec :

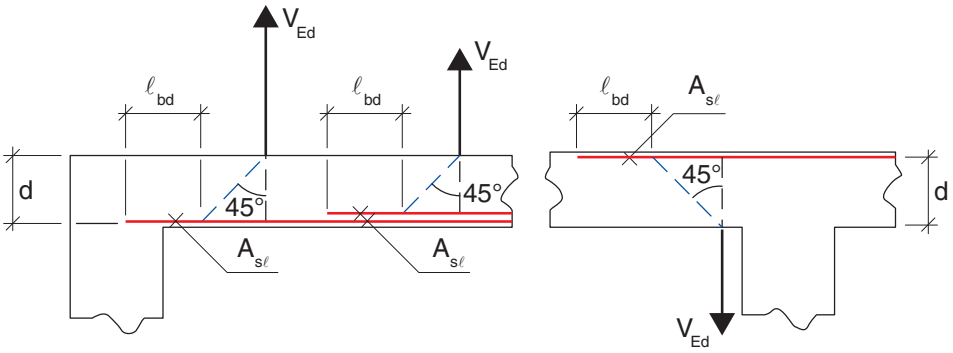
$C_{Rd,\,c} = \dfrac{0{,}18}{\gamma_c}$ valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[9],

6. EC 2 – 6.2.1 (4)
7. EC 2 – 6.2.1 (4)
8. EC 2 – 6.2.2 (1)
9. EC 2 – voir AN

$$k = \text{Min}\begin{cases} 1 + \sqrt{\dfrac{200\ \text{mm}}{d}} \\ 2 \end{cases}$$

$\rho_l = \dfrac{A_{sl}}{b_w.d} \not> 2\%$ = pourcentage d'armatures longitudinales,

où :
A_{sl} = aire de l'armature longitudinale prolongée d'une longueur supérieure à $d + l_{bd}$ au-delà de la section considérée :



Cas des armatures inférieures — Cas des armatures supérieures

b_w = largeur minimale de la section dans la zone tendue,

$\sigma_{cp} = \dfrac{N_{Ed}}{A_c} < 0,2.f_{cd}$,

où :
N_{Ed} = effort normal dans la section (charges, précontrainte), positif pour une compression,
A_c = aire du béton seul de la section droite,

$v_{min} = 0,035.k^{3/2}.\sqrt{f_{ck}}$ valeur recommandée, remplacée par : **(6.3N)**

$$v_{min} = \begin{cases} \dfrac{0,34}{\gamma_c}\sqrt{f_{ck}} : \text{dalles bénéficiant d'un effet de redistribution transversale sous le cas de charge considéré,} \\ \dfrac{0,053}{\gamma_c}k^{3/2}.\sqrt{f_{ck}} : \text{poutres et autres dalles,} \\ \dfrac{0,35}{\gamma_c}\sqrt{f_{ck}} : \text{voiles,} \end{cases}$$

dans l'Annexe nationale française[10],

10. EC 2 – voir AN

$k_1 = 0,15$ valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[11].

Remarque

Il revient au même de considérer la contrainte tangente conventionnelle :

$$v_{Rd,\,c} = \frac{V_{Rd,\,c}}{b_w.d} = \text{Max}\begin{cases} C_{Rd,\,c}.k.\sqrt[3]{100.\rho_1.f_{ck}} + k_1.\sigma_{cp} = v_{Rd,\,c1} \\ v_{min} + k_1.\sigma_{cp} = v_{Rd,\,c2} \end{cases}$$

3.2.2 Calcul de $V_{Rd,\,max}$ lorsque les armatures d'effort tranchant ne sont pas requises

Lorsque $V_{Ed} \leq V_{Rd,\,max}$, il faut vérifier (voir équation [8.5] avec sa valeur maximale obtenue pour $\alpha = 90°$)[12] :

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,\,max} = \nu_1.f_{cd}.b_w.z\,\frac{\text{cotg}\theta}{1+\text{cotg}^2\theta}$$

$$\boxed{V_{Ed} \leq V_{Rd,\,max} = \nu_1.f_{cd}.b_w.z\,\frac{1}{\text{tg}\theta+\text{cotg}\theta}} \quad \text{où } z = 0,9.d \qquad \textbf{(6.9)}$$

avec comme valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[13] :

$$\nu_1 = \nu = 0,6\left(1-\frac{f_{ck}}{250}\right) \quad \text{où } f_{ck} \text{ en MPa} \qquad \textbf{(6.6N)}$$

Remarque

Dans le cas de structures précontraintes, la formule donnant $V_{Rd,\,max}$ est corrigée à l'aide d'un coefficient multiplicateur α_{cw} fonction de l'intensité de la contrainte de compression due à la précontrainte.

Ou, en raisonnant à partir de la contrainte tangente conventionnelle, il faut vérifier :

$$v_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{b_w.d} \leq v_{Rd,\,max} = 0,9.\nu_1.f_{cd}\,\frac{1}{\text{tg}\theta+\text{cotg}\theta} = 0,9.\nu_1.f_{cd}.\sin\theta.\cos\theta$$

11. EC 2 – voir AN
12. EC 2 – 6.2.1 (6) + 6.2.3 (3)
13. EC 2 – voir AN

3.2.3 Force de traction dans l'armature longitudinale

Pour les arrêts de barres, il convient de décaler la courbe des moments (ou de la variation de la force dans l'armature longitudinale), dans la direction la plus défavorable, de la quantité[14] :

$$\boxed{a_l = d}$$

3.3 Vérifications

3.3.1 Nécessité de prévoir des armatures d'effort tranchant

Il n'y a pas lieu de prévoir des armatures d'effort tranchant si[15] :

$$\boxed{V_{Ed} \leq V_{Rd,\,c1}} \text{ ou } \boxed{v_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{b_w.d} \leq v_{Rd,\,c1}}$$

avec :

$V_{Ed} = V_{Ed0}$ en cas de prédominance des charges réparties[16] (voir § 2.3.1).

$V_{Ed} = V'_{Ed0}$ en cas de charges concentrées au voisinage des appuis[17] (voir § 2.3.2),

$$\boxed{V_{Ed} \leq V_{Rd,\,c2}} \text{ ou } \boxed{v_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{b_w.d} \leq v_{Rd,\,c2}}$$

avec : $V_{Ed} = V_{Ed0}$ en cas de prédominance des charges réparties[18] (voir § 2.3.1).

Vérification complémentaire pour l'effort tranchant non réduit en cas de charges concentrées au voisinage des appuis :

$$\boxed{V_{Ed} \leq 0{,}5.b_w.d.\nu.f_{cd}} \qquad \textbf{(6.5)}$$

avec comme valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[19] :

$$\nu = 0{,}6\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \text{ où } f_{ck} \text{ en MPa} \qquad \textbf{(6.6N)}$$

14. EC 2 – 6.2.2 (5)
15. EC 2 – 6.2.1 (3)
16. EC 2 – 6.2.1 (8)
17. EC 2 – 6.2.2 (6)
18. EC 2 – 6.2.1 (8)
19. EC 2 – voir AN

3.3.2 Vérification de la compression des bielles de béton

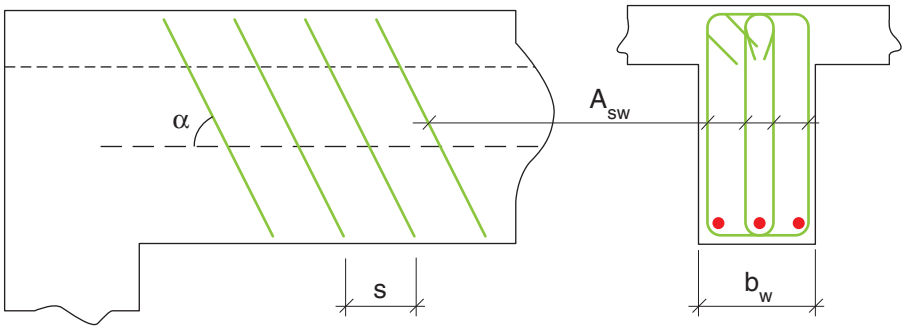
$$V_{Ed} \leq V_{Rd,\,max} \quad \text{ou} \quad v_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{b_w.d} \leq v_{Rd,\,max}$$ [20]

avec V_{Ed} = effort tranchant non réduit pour transmission directe des charges aux appuis.

3.4 Pourcentage minimal d'armatures transversales

Même lorsqu'aucune armature d'effort tranchant n'est requise, un ferraillage transversal minimal est à prévoir[21].

Le pourcentage d'armatures d'effort tranchant est défini par[22] :



$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s.b_w.\sin\alpha} \qquad \textbf{(9.4)}$$

La valeur minimale de ρ_w est :

$$\rho_{w,\,min} = 0,08\frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \quad (f_{ck} \text{ et } f_{yk} \text{ en MPa}) \qquad \textbf{(9.5N)}$$

valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[23].

20. EC 2 – 6.2.1 (6)
21. EC 2 – 6.2.1 (4)
22. EC 2 – 9.2.2 (5)
23. EC 2 – voir AN

4. Éléments de hauteur constante nécessitant des armatures d'effort tranchant

4.1 Valeur de $V_{Rd,\,c}$ lorsque les armatures d'âme sont nécessaires

L'effort tranchant résistant de calcul de l'élément sans armatures d'effort tranchant – $V_{Rd,\,c}$ – est donné par l'expression [8.11] du § 3.2.1.

4.2 Vérification

Mettre le pourcentage minimal d'armatures transversales défini au § 3.4 si :

$\boxed{V_{Ed} \leq V_{Rd,\,c1}}$ ou $\boxed{v_{Ed} = \dfrac{V_{Ed}}{b_w.d} \leq v_{Rd,\,c1}}$ [24]

avec :

$V_{Ed} = V_{Ed0}$ en cas de prédominance des charges réparties[25] (voir § 2.3.1).

$V_{Ed} = V'_{Ed0}$ en cas de charges concentrées au voisinage des appuis[26] (voir § 2.3.2),

$\boxed{V_{Ed} \leq V_{Rd,\,c2}}$ ou $\boxed{v_{Ed} = \dfrac{V_{Ed}}{b_w.d} \leq v_{Rd,\,c2}}$ [27]

avec : $V_{Ed} = V_{Ed0}$ en cas de prédominance des charges réparties[28] (voir § 2.3.1).

Sinon, il convient de calculer les armatures transversales en vérifiant :

$V_{Ed} \leq V_{Rd,\,s}$

avec :

$V_{Ed} = V_{Ed0}$ en cas de prédominance des charges réparties[29] (voir § 2.3.1),

$V_{Ed} = V'_{Ed0}$ en cas de charges concentrées au voisinage des appuis[30] (voir § 2.3.2).

Vérifications complémentaires en cas de charges concentrées au voisinage des appuis[31] :

---

24. EC 2 – 6.2.1 (3) & (5)
25. EC 2 – 6.2.1 (8)
26. EC 2 – 6.2.3 (8)
27. EC 2 – 6.2.1 (3)
28. EC 2 – 6.2.1 (8)
29. EC 2 – 6.2.1 (8)
30. EC 2 – 6.2.3 (8)
31. EC 2 – 6.2.3 (8)

$\boxed{V_{Ed} \leq 0,5.b_w.d.v.f_{cd}}$ pour l'effort tranchant non réduit. **(6.5)**

4.3 Principe de la méthode de calcul

Lorsque : $V_{Ed} > V_{Rd,\,c}$ on se réfère au modèle du treillis généralisé (de Mörsh) qui impose deux conditions[32] :

- limitation de l'effort tranchant agissant de calcul à une valeur $V_{Rd,\,max}$ définie par une limitation de la contrainte de compression dans les bielles de béton découpées par les fissures inclinées ; cette condition fixe ainsi la largeur minimale de l'âme ;
- limitation de l'effort tranchant de calcul à une valeur $V_{Rd,\,s}$ définie par une limitation de la contrainte de traction dans l'armature d'effort tranchant et tenant compte d'un certain nombre d'effets secondaires. Cette condition fixe ainsi le pourcentage d'armatures d'effort tranchant nécessaire.

4.4 Méthode de l'inclinaison variable des bielles

4.4.1 Introduction

Dans cette méthode, l'inclinaison θ des bielles sur la ligne moyenne est choisie de telle sorte que[33] :

$\boxed{1 \leq \cot g\theta \leq 2,5} \quad \Leftrightarrow \quad 21,8° \leq \theta \leq 45°$ **(6.7N)**

ou valeur fixée par l'Annexe nationale[34].

L'Annexe nationale française préconise :

$\boxed{1 \leq \cot g\theta \leq 2,5}$ $\Leftrightarrow$ $21,8° \leq \theta \leq 45°$ en flexion simple ou compression **(6.7aNF)**

$\boxed{\sqrt{1+\frac{\sigma_{ct}}{f_{ctm}}} \leq \cot g\theta \leq 2,5\sqrt{1+\frac{\sigma_{ct}}{f_{ctm}}}}$ en traction **(6.7bNF)**

avec : $\sigma_{ct}\,(<0)$: contrainte de traction au niveau du centre de gravité de la section.

4.4.2 Vérification de la compression des bielles de béton

Il faut vérifier[35] :

32. EC 2 – 6.2.1 (5) et 6.2.3 (1)
33. EC 2 – 6.2.3 (2)
34. EC 2 – voir AN
35. EC 2 – 6.2.3 (4)

$$\boxed{V_{Ed} \le V_{Rd,\,max}} \text{ ou } \boxed{v_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{b_w.d} \le v_{Rd,\,max}}$$

L'équation [8.5] s'écrit[36] :

$$\boxed{V_{Rd,\,max} = b_w.z.\nu_1.f_{cd}\,\frac{\cot g\theta + \cot g\alpha}{1+\cot g^2\theta}} \text{ où } z = 0{,}9.d \qquad \textbf{(6.14)}$$

avec, en se plaçant en sécurité par rapport aux résultats d'essais[37] :

$$\nu_1 = \nu = 0{,}6\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \text{ avec } f_{ck} \text{ en MPa,} \qquad \textbf{(6.6N)}$$

valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[38].

Remarque 1

Lorsque $f_{ywd} < 0{,}8.f_{yk}$, on peut adopter pour ν_1 la valeur[39] :

$$\nu_1 = \begin{cases} 0{,}6 \text{ si } f_{ck} \le 60 \text{ MPa} \\ \text{Max}\begin{cases} 0{,}9 - \dfrac{f_{ck}}{200} \text{ si } f_{ck} > 60 \text{ MPa} \\ 0{,}5 \end{cases} \end{cases} \text{ avec } f_{ck} \text{ en MPa.} \qquad \textbf{(6.10.aN \& bN)}$$

Remarque 2

Dans le cas de structures précontraintes, la formule donnant $V_{Rd,\,max}$ est corrigée à l'aide d'un coefficient multiplicateur α_{cw} fonction de l'intensité de la contrainte de compression due à la précontrainte.

4.4.3 Armatures d'effort tranchant

L'équation [8.6] avec z = 0,9.d fournit l'expression générale de l'effort tranchant résistant de calcul[40] :

$$V_{Rd,\,s} = \rho_w.f_{ywd}.\sin^2\alpha\left(\cot g\theta + \cot g\alpha\right).\left(b_w.z\right)$$

$$\text{avec : } \rho_w = \frac{A_{sw}}{s.b_w.\sin\alpha}$$

d'où :

$$V_{Rd,\,s} = \frac{A_{sw}}{s} z.f_{ywd}\left(\cot g\theta + \cot g\alpha\right).\sin\alpha \quad \Rightarrow$$

36. EC 2 – 6.2.3 (4) & (1)
37. EC 2 – 6.2.2 (6)
38. EC 2 – voir AN
39. EC 2 – 6.2.3 (3)
40. EC 2 – 6.2.3 (4)

$$\begin{cases} \dfrac{A_{sw}}{s} = \dfrac{V_{Rd,\,s}}{z.f_{ywd}\left(\cot g\theta + \cot g\alpha\right).\sin\alpha} \\ V_{Rd,\,s} = V_{Ed}, V_{Ed0} \text{ ou } V'_{Ed0} \\ z = 0,9.d \end{cases} \qquad \textbf{(6.13)}$$

Armature maximale d'effort tranchant[41] (voir équation [8.10]) :

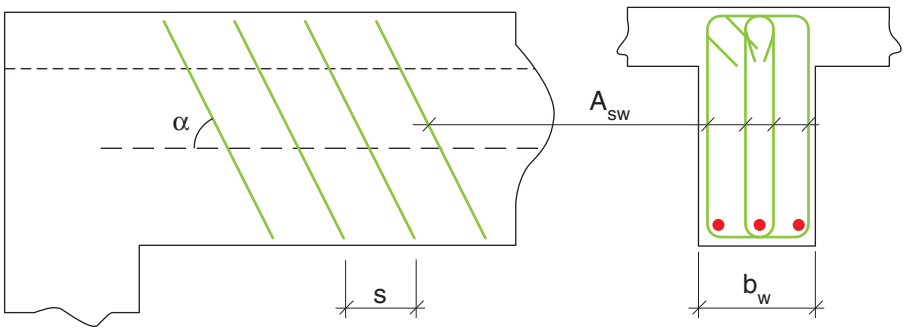
$$\frac{A_{sw,\,max}.f_{ywd}}{b_w.s} \le \frac{\frac{1}{2}\nu_1.f_{cd}.\sin\alpha}{1-\cos\alpha} \qquad \textbf{(6.15)}$$

Remarque

Dans le cas de structures précontraintes, le second membre de cette formule est corrigé à l'aide d'un coefficient multiplicateur α_{cw} fonction de l'intensité de la contrainte de compression due à la précontrainte.

4.4.4 Pourcentage minimal d'armatures transversales

Le pourcentage d'armatures d'effort tranchant est défini par[42] :



$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s.b_w.\sin\alpha} \qquad \textbf{(9.4)}$$

La valeur minimale de ρ_w est :

$$\rho_{w,\,min} = 0,08\frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \quad (f_{ck} \text{ et } f_{yk} \text{ en MPa}) \qquad \textbf{(9.5N)}$$

valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[43].

41. EC 2 – 6.2.3 (4)
42. EC 2 – 9.2.2 (5)
43. EC 2 – voir AN

4.4.5 Vérification complémentaire pour les charges concentrées au voisinage des appuis

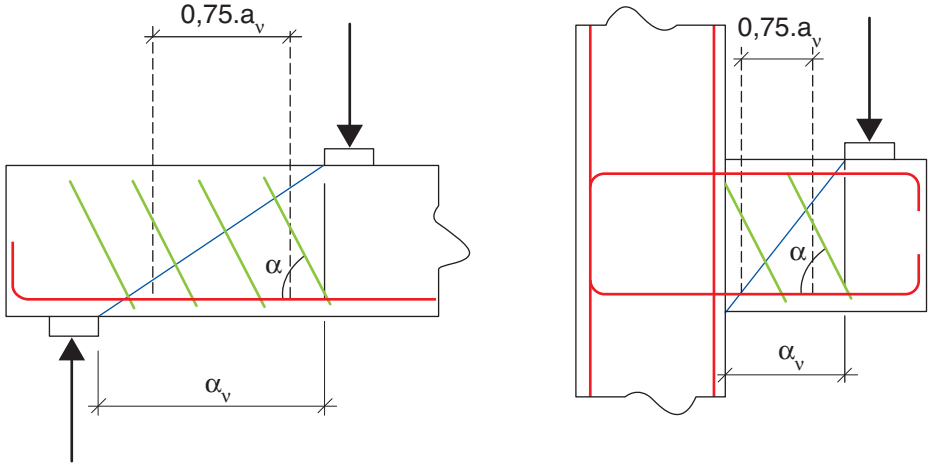
Il faut vérifier[44] :

$\boxed{V_{Ed} \le A_{sw}.f_{ywd}.\sin\alpha}$ pour l'effort tranchant réduit $V_{Ed} = V'_{Ed0}$, **(6.19)**

avec :

$A_{sw}.f_{ywd}$ = résistance des armatures d'âme traversant la fissure inclinée partant du nu d'appui et disposées sur la longueur $0,75.a_v$ dans la partie médiane de cette fissure.

Section d'armatures transversales par unité de longueur :



$$\frac{A_{sw}}{0,75.a_v} \ge \frac{V_{Ed}}{0,75.a_v.f_{ywd}.\sin\alpha}$$

Il faut donc vérifier :

$$\frac{A_{sw}}{s} \ge \frac{V'_{Ed0}}{0,75.a_v.f_{ywd}.\sin\alpha}$$

4.4.6 Force de traction dans l'armature longitudinale

Cette force[45] est égale à (voir § 2.1.5) :

$$\boxed{F_{td} = \frac{M_{Ed}}{z} + \frac{1}{2}V_{Ed}\left(\cot g\theta - \cot g\alpha\right)} < \frac{M_{Ed,\ max}}{z} \quad \text{où } z = 0,9.d. \qquad \textbf{(6.18)}$$

44. EC 2 – 6.2.3 (8)
45. EC 2 – 6.2.3 (7)

Pour les arrêts de barres, il revient au même de décaler la courbe des moments (ou de la variation de la force dans l'armature longitudinale) de la quantité[46] :

$$a_1 = z\frac{\cot g\theta - \cot g\alpha}{2} \neq 0 \quad \text{où } z = 0{,}9.d. \qquad \textbf{(9.2)}$$

4.4.7 Marche à suivre

Le projeteur est, en principe, totalement libre du choix de l'angle θ d'inclinaison des bielles, pourvu que cet angle reste dans la fourchette (voir § 4.4.1) :

$$1 \leq \cot g\theta \leq 2{,}5 \quad \text{ou} \quad \sqrt{1+\frac{\sigma_{ct}}{f_{ctm}}} \leq \cot g\theta \leq 2{,}5\sqrt{1+\frac{\sigma_{ct}}{f_{ctm}}}.$$

En désignant par V_{Ed}, l'effort tranchant de calcul (non réduit pour tenir compte du phénomène de transmission directe des charges aux appuis), on peut essayer de faire travailler les bielles au maximum de leur capacité en réalisant :

$$V_{Ed} = V_{Rd,\,max} = b_w.z.\nu_1.f_{cd}\frac{\cot g\theta + \cot g\alpha}{1+\cot g^2\theta}$$

d'où, en posant :

$$\nu_0 = \frac{V_{Ed}}{b_w.z.\nu_1.f_{cd}} = \frac{\cot g\theta + \cot g\alpha}{1+\cot g^2\theta} \quad \Rightarrow \quad \nu_0\left(1+\cot g^2\theta\right) = \cot g\theta + \cot g\alpha$$

$$\nu_0.\cot g^2\theta - \cot g\theta + \left(\nu_0 - \cot g\alpha\right) = 0$$

l'angle d'inclinaison sur la ligne moyenne des bielles comprimées est donné par :

$$\cot g\theta = \frac{1+\sqrt{1-4.\nu_0\left(\nu_0 - \cot g\alpha\right)}}{2.\nu_0} \Rightarrow \theta \text{ (signe + devant le radical pour obtenir } \theta_{max})$$

D'où la marche à suivre :

$$\cot g\theta = \frac{1+\sqrt{1-4.\nu_0\left(\nu_0 - \cot g\alpha\right)}}{2.\nu_0}$$

$\Rightarrow$ θ choisi dans la fourchette précisée au § 4.4.1

$$\Rightarrow \quad \frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{Ed}}{z.f_{ywd}\left(\cot g\theta + \cot g\alpha\right).\sin\alpha} \qquad [8.12]$$

où $z = 0{,}9.d$ et $V_{Ed} = V_{Ed0}$ ou V'_{Ed0} au voisinage des appuis.

$\Rightarrow$ Choisir le tracé des armatures d'effort tranchant en fonction de celui des armatures longitudinales. En déduire A_{sw}.

46. EC 2 – 9.2.1.3 (2)

⇒ En déduire l'espacement s par l'équation [8.12].

⇒ Vérifier les conditions relatives à l'espacement maximal (voir § 6.3).

⇒ S'assurer que les pourcentages minimal (§ 4.4.4) et maximal (§ 4.4.3) sont bien vérifiés.

⇒ Faire la vérification complémentaire en cas de charges concentrées au voisinage des appuis (voir § 4.4.5).

4.5 Méthode standard – Bielles inclinées à 45°

4.5.1 Vérification de la compression des bielles de béton

Il faut vérifier[47] :

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,\,max} \quad \text{ou} \quad v_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{b_w.d} \leq v_{Rd,\,max}$$

Pour $\theta = 45°$, $\cot g\theta = 1$ et l'équation [8.5] s'écrit :

$$V_{Rd,\,max} = \frac{1}{2} \nu_1 . f_{cd} . b_w . 0,9.d\left(1 + \cot g\alpha\right) \quad \text{où } z = 0,9.d$$

avec ν_1 déterminé comme indiqué au § 4.4.2.

4.5.2 Armatures d'effort tranchant

4.5.2.1 Terme $V_{Rd,\,s}$

Pour $\theta = 45°$; $\cot g\theta = 1$ et l'équation [8.6] s'écrit[48] :

$$V_{Rd,\,s} = \rho_w . f_{ywd} . \sin^2 \alpha \left(1 + \cot g\alpha\right).0,9.b_w.d$$

soit pour : $\rho_w = \dfrac{A_{sw}}{s.b_w.\sin\alpha}$:

$$V_{Rd,\,s} = \frac{A_{sw}}{s} 0,9.d.f_{ywd}\left(1 + \cot g\alpha\right)\sin\alpha$$

avec :

A_{sw} = aire de la section droite d'une nappe d'armatures d'effort tranchant,

s = espacement de ces nappes suivant la ligne moyenne,

47. EC 2 – 6.2.3 (4)
48. EC 2 – 6.2.3 (4)

$f_{ywd} = \dfrac{f_{ywk}}{\gamma_s}$ = limite élastique de calcul des armatures d'effort tranchant,

α = inclinaison des armatures d'effort tranchant sur la ligne moyenne.

4.5.2.2 Section d'armatures transversales

Section d'armatures calculée[49] :

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{Rd,\,s}}{0,9.d.f_{ywd}\left(1+\cot g\alpha\right)\sin\alpha} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} \dfrac{A_{sw}}{s} = \dfrac{V_{Rd,\,s}}{0,9.d.f_{ywd}\left(\sin\alpha+\cos\alpha\right)} \\ V_{Rd,\,s} = V_{Ed},\, V_{Ed0} \text{ ou } V'_{Ed0} \end{cases}$$

Armature maximale d'effort tranchant (voir équation [8.10]) :

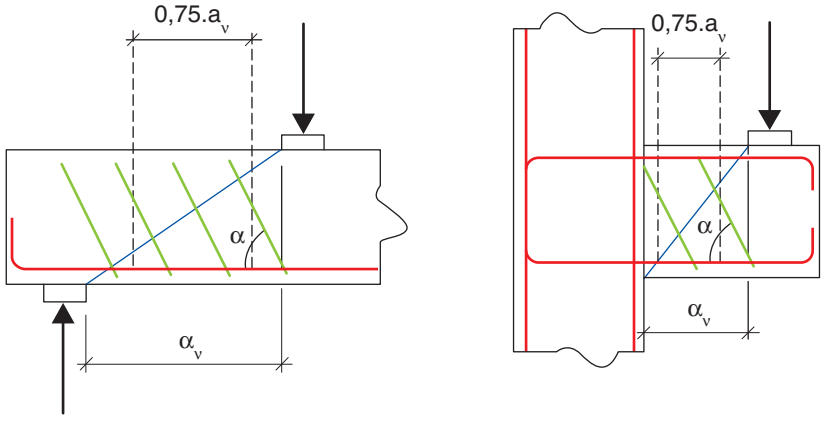
$$\boxed{\frac{A_{sw,\,max}.f_{ywd}}{b_w.s} \le \frac{\frac{1}{2}\nu_1.f_{cd}.\sin\alpha}{1-\cos\alpha}}$$

Vérification complémentaire pour les charges concentrées au voisinage des appuis[50] :

$\boxed{V_{Ed} \le A_{sw}.f_{ywd}.\sin\alpha}$ pour l'effort tranchant réduit $V_{Ed} = V'_{Ed0}$ **(6.19)**

avec :

$A_{sw}.f_{ywd}$ = résistance des armatures d'âme traversant la fissure inclinée partant du nu d'appui et disposées sur la longueur $0,75.a_v$ dans la partie médiane de cette fissure.



49. EC 2 – 6.2.3 (4)
50. EC 2 – 6.2.3 (8)

Section d'armatures transversales par unité de longueur :

$$\frac{A_{sw}}{0,75.a_v} \geq \frac{V_{Ed}}{0,75.a_v.f_{ywd}.\sin\alpha}$$

Il faut donc vérifier :

$$\boxed{\frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{V'_{Ed0}}{0,75.a_v.f_{ywd}.\sin\alpha}}$$

4.5.3 Force de traction dans larmature longitudinale

Pour $\theta = 45^\circ$, cette force[51] est égale à (voir § 2.1.5) :

$$\boxed{F_{td} = \frac{M_{Ed}}{z} + \frac{1}{2}V_{Ed}\left(1 - \text{cotg}\alpha\right) < \frac{M_{Ed,\,max}}{z}} \text{ avec } z = 0,9.d$$

Pour les arrêts de barres, il revient au même de décaler la courbe des moments (ou de la variation de la force dans l'armature longitudinale) de la quantité :

$$a_l = z\frac{1 - \text{cotg}\alpha}{2} = 0,9.d\frac{1 - \text{cotg}\alpha}{2} \not< 0$$

4.6 Comparaison des deux méthodes

Considérons des armatures d'effort tranchant droites ($\alpha = 90^\circ$).

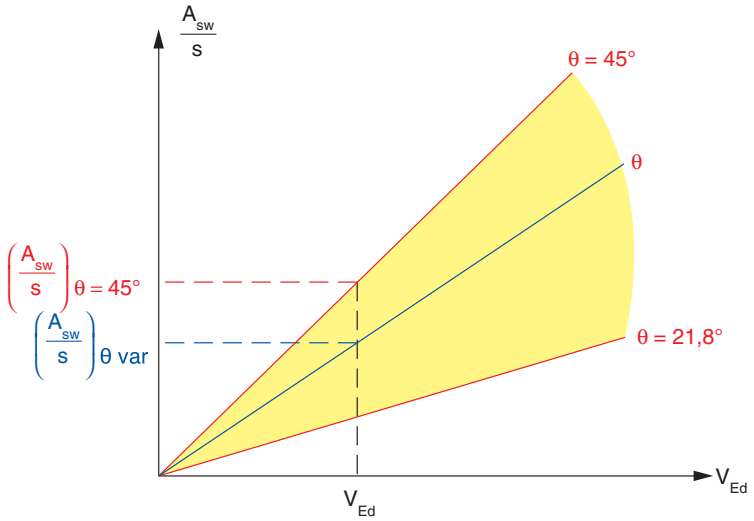
Les armatures d'effort tranchant sont obtenues, dans la méthode des bielles d'inclinaison variables par (voir § 4.4.3) :

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{Rd,\,s}}{0,9.d.f_{ywd}\left(\text{cotg}\theta + \text{cotg}\alpha\right)\sin\alpha} = \frac{V_{Ed}}{0,9.d.f_{ywd}.\text{cotg}\theta} = \frac{V_{Ed}}{0,9.d.f_{ywd}}\text{tg}\theta$$

soit, en fonction de θ, par des droites d'équation $\frac{A_{sw}}{s} = a.V_{Ed}.\text{tg}\theta$ passant par l'origine du repère $\left(\frac{A_{sw}}{s}, V_{Ed}\right)$.

D'où la représentation graphique de la fonction : $\frac{A_{sw}}{s} = f\left(V_{Ed}\right)$

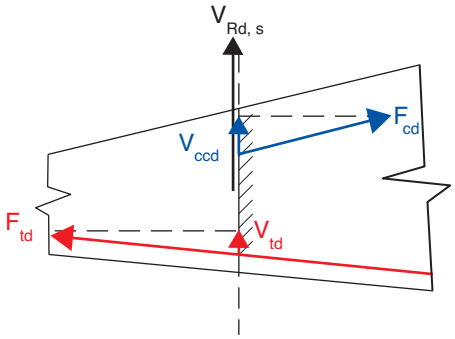
51. EC 2 – 6.2.3 (7)



Pour une valeur donnée de l'effort tranchant V_{Ed}, la méthode des bielles d'inclinaison variable donne donc moins d'aciers transversaux que la méthode standard (θ = 45°). Mais le décalage de la courbe enveloppe des moments pour la répartition des armatures longitudinales est plus important (voir § 4.4.6 pour a_l) et les longueurs des barres longitudinales également. Un bilan comparatif entre les deux cas étant à faire.

5. Éléments de hauteur variable

Les forces internes dues à l'action du moment fléchissant développent une composante verticale $V_{ccd} + V_{td}$ qui compense une part de l'effort tranchant de calcul V_{Ed}.



Dans ce cas, la résistance à l'effort tranchant d'un élément comportant des armatures d'effort tranchant est donnée par la formule[52] :

52. EC 2 – 6.2.1 (1) & (2)

$$V_{Rd} = V_{Rd,\,s} + V_{ccd} + V_{td} \qquad \textbf{(6.1)}$$

avec :

$V_{Rd,\,s}$ = effort tranchant de calcul pouvant être supporté par un élément avec armatures d'effort tranchant,

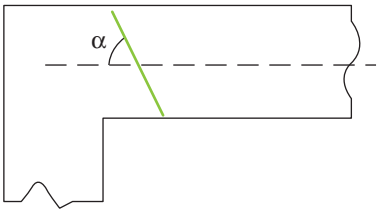
V_{ccd} = composante parallèle à $V_{Rd,\,s}$ de la force de compression dans la zone comprimée,

V_{td} = composante parallèle à $V_{Rd,\,s}$ de la force de traction dans les armatures tendues.

Toutes les formules des § 3 et 4 précédents (y compris celles relatives au calcul de la force F_{td}) s'appliquent donc[53], en remplaçant V_{Ed} par $V_{Ed} - (V_{ccd} + V_{td})$.

6. Dispositions constructives

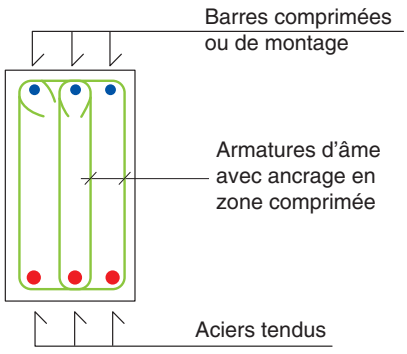
6.1 Inclinaison des armatures d'effort tranchant[54]



$45° \leq \alpha \leq 90°$

6.2 Tracé des armatures d'âme

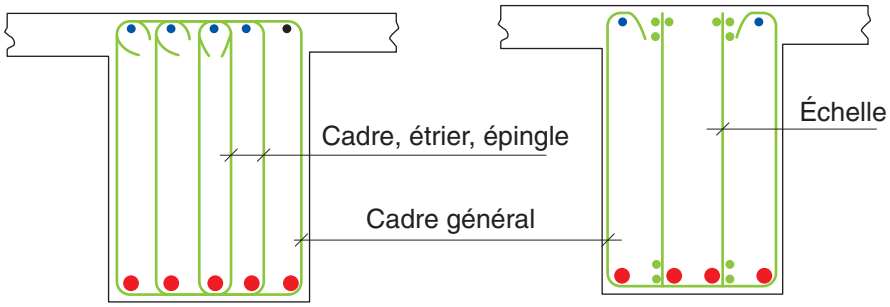
Cadres, étriers et épingles encerclant les armatures longitudinales tendues et la zone comprimée[55] :



53. EC 2 – 6.2.1 (1) & 6.2.1 (6)
54. EC 2 – 9.2.2 (1)
55. EC 2 – 9.2.2 (2)

Pour les bâtiments uniquement[56] : assemblages de cages, d'échelles, etc. en barres HA :

- formant ceinture de l'ensemble des armatures longitudinales ;
- maintenant les barres longitudinales intermédiaires ;
- correctement ancrées dans les zones tendue et comprimée :



6.3 Espacements

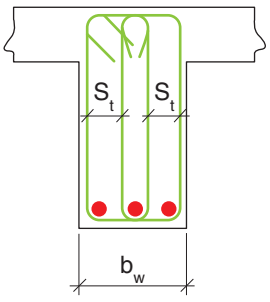
6.3.1 Espacement longitudinal maximal

On doit vérifier[57] [58] :

$$s \leq s_{l,\,max} = \text{Min}\begin{cases} 0,75.d\left(1+\text{cotg}\alpha\right) \\ 15.\phi \text{ si } A_{s2} \neq 0 \end{cases} \qquad \textbf{(9.6N)}$$

valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française.
ϕ = diamètre minimal des aciers comprimés,

6.3.2 Espacement transversal maximal[59]



56. EC 2 – 9.2.2 (101)
57. EC 2 – 9.2.2 (6) + voir AN
58. EC 2 – 9.2.1.2 (3)
59. EC 2 – 9.2.2 (8)

Il faut vérifier :

$$s_t \leq s_{t,\,max} = \text{Min}\begin{cases} 0,75.d \\ 600\ \text{mm} \end{cases} \qquad \textbf{(9.8N)}$$

valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[60].

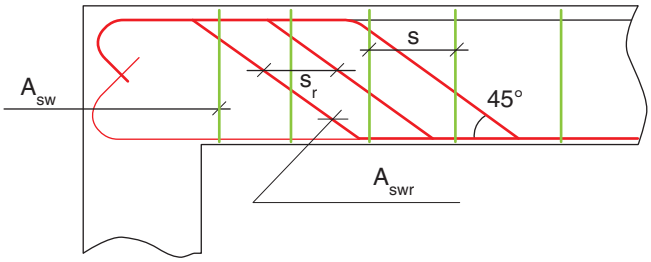
7. Barres relevées à 45°

Une part $(1-\beta_3)$ au plus égale à la moitié de l'effort tranchant peut être équilibrée par des barres de la membrure tendue, relevées à 45° et ancrées sur appuis[61].

Le complément β_3 étant toujours équilibré par des armatures d'âme.

Remarque

En général, les armatures d'âme associées aux barres relevées sont droites (α = 90°).



On pose :

A_{swr} = section d'une nappe de barres relevées,

A_{sw} = section d'une nappe d'armatures d'âme,

s_r , s = espacements respectifs de ces nappes.

7.1 Vérification de la compression des bielles de béton

Il faut vérifier[62] :

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,\,max} \quad \text{ou} \quad v_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{b_w.d} \leq v_{Rd,\,max}$$

60. EC 2 – voir AN
61. EC 2 – 9.2.2 (4)
62. EC 2 – 6.2.1 (6)

avec :

$$V_{Rd,\ max} = b_w.z.\nu_1.f_{cd}\frac{\cot g\theta + \cot g\alpha}{1+\cot g^2\theta}$$ avec z = 0,9.d,

avec ν_1 déterminé comme indiqué au § 4.4.2.

La contrainte tangente conventionnelle correspondante vaut alors :

$$v_{Rd,\ max} = 0,9.\nu_1.f_{cd}\frac{\cot g\theta + \cot g\alpha}{1+\cot g^2\theta}$$

7.2 Armatures calculées

En remplaçant V_{Ed} par V_{Ed0} ou V'_{Ed0} en cas de prise en compte du phénomène de transmission des charges aux appuis (voir § 2.3).

Armatures d'âme[63] :

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq \beta_3 \frac{V_{Ed}}{z.f_{ywd}\left(\cot g\theta + \cot g\alpha\right)\sin\alpha}$$ où z = 0,9.d

$\beta_3 \geq \frac{1}{2}$ valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[64].

Armatures relevées ($\alpha = 45°$)[65] :

$$\frac{A_{swr}}{s_r} \geq \left(1-\beta_3\right)\frac{V_{Ed}}{z.f_{ywd}\left(\cot g\theta + 1\right)\frac{\sqrt{2}}{2}}$$ où z = 0,9.d.

$\beta_3 \geq \frac{1}{2}$ valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[66].

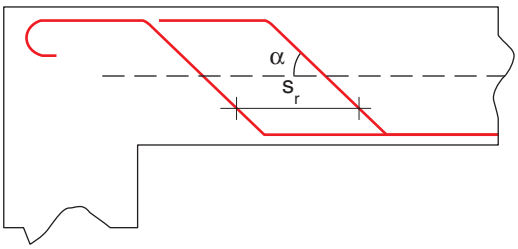
Il faut, en outre, vérifier :

- le pourcentage minimal d'armatures d'effort tranchant (voir § 4.4.4) en cumulant les deux systèmes d'armatures ;
- l'espacement maximal :
  - pour les armatures d'âme (voir § 6.3.1) ;
  - pour les barres relevées[67] :

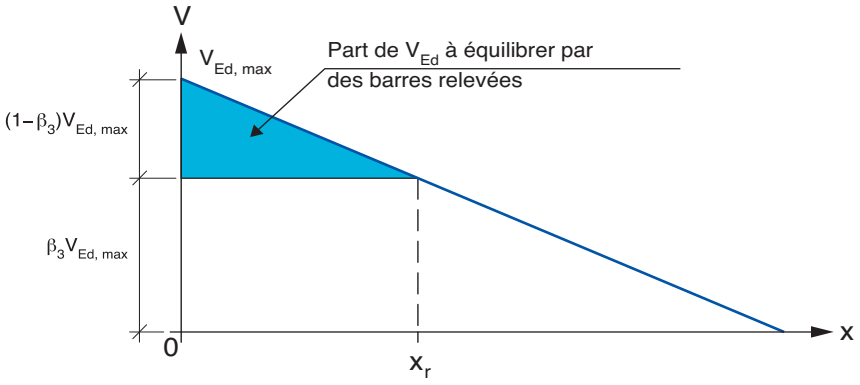
$$s_r \leq s_{b,\ max} = 0,6.d\left(1+\cot g\alpha\right) \qquad \textbf{(9.7N)}$$

63. EC 2 – 6.2.3 (4)
64. EC 2 – 9.2.2 (4) + voir AN
65. EC 2 – 6.2.3 (4)
66. EC 2 – 9.2.2 (4) + voir AN
67. EC 2 – 9.2.2 (7)

valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[68].



Les barres relevées doivent être conservées jusqu'à l'abscisse x_r où l'équilibre peut à nouveau être assuré par les seules armatures d'âme :



Il n'est pas de bonne construction de prévoir une seule nappe de barres relevées traversant la section d'appui.

La longueur d'ancrage des barres relevées ne doit pas être inférieure à[69] :

- $1,3.l_{bd}$ en zone tendue ;
- ou $0,7.l_{bd}$ en zone comprimée ;

cette longueur est comptée depuis le point d'intersection de l'axe de la barre relevée avec celui des armatures longitudinales.

68. EC 2 – voir AN
69. EC 2 – 9.2.1.3 (4)

8. Répartition des armatures transversales (méthode Caquot)

8.1 Hypothèses

Méthode applicable uniquement aux poutres :

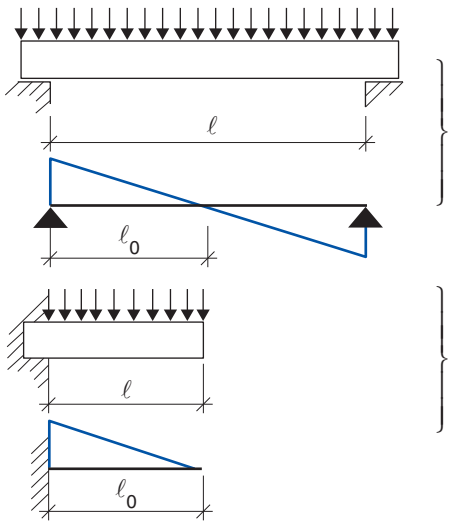
- de section constante ;
- supportant des charges uniformément réparties[70].

Dans les autres cas, voir § 3, chapitre 10 : « Épures de repartition des armatures longitudinales et des armatures d'ame ».

8.2 Notations

ℓ_0 = distance du nu d'appui à la section où l'effort tranchant V_{Ed} s'annule.

Pour des travées complètement chargées, on a :



Poutre sur deux appuis simples

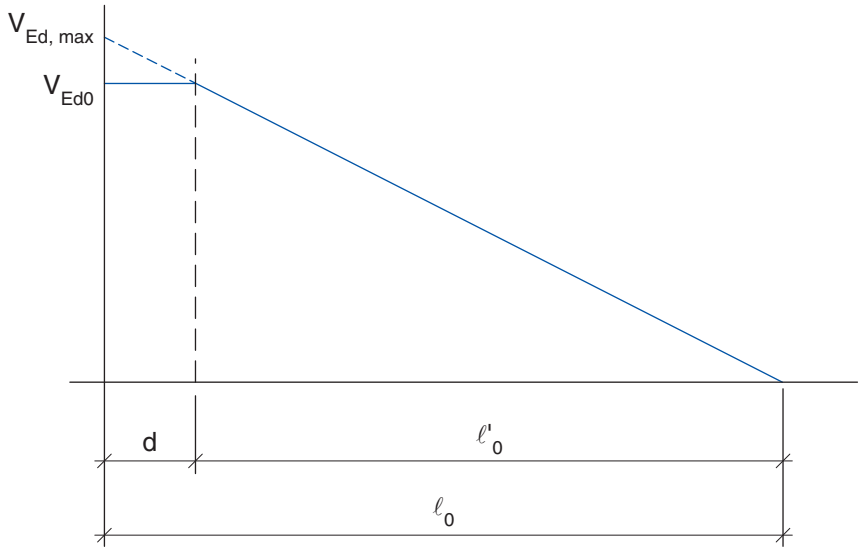
$$\ell_0 = \frac{\ell}{2}$$

Console

$$\ell_0 = \ell$$

Pour tenir compte de la réduction d'effort tranchant pour transmission directe de charges aux appuis, on considère la longueur ℓ_0' suivante :

70. EC 2 – 6.2.1 (8)



on a :

$\ell'_0 = \ell_0 - d$

La répartition des armatures transversales s'effectue donc de la manière suivante :

1/ répartition sur la longueur d pour l'espacement initial s_0 calculé pour V_{Ed0} ;

2/ au-delà de la section d'abscisse d, répartition suivant la règle de Caquot avec un nombre de répétitions égal à ℓ'_0(m).

8.3 Méthode Caquot

1/ L'écartement initial s_0 est calculé suivant les indications du § 4.4.7 (inclinaison variable des bielles) ou 4.5.2 (bielles inclinées à 45°) pour l'effort tranchant V_{Ed0},

2/ L'écartement de départ des armatures d'âme ($s_1 \leq s_0$) est choisi dans la suite : 7, 8, 9, 10, 11, 13, 16, 20, 25, 35, 40 et 60 cm

3/ Depuis l'abscisse $s_0/2$, on répète les espacements $s_{i+1} \geq s_i$ (de la suite) avec un nombre de répétitions :

$$\left.\begin{array}{l} \ell'_0 + \dfrac{d}{s_0} \text{ pour le premier espacement} \\ \ell'_0 \quad \text{pour les espacements suivants} \end{array}\right\} \quad \text{avec } \ell'_0 \text{ en mètres,}$$

4/ Si le nombre de répétitions n'est pas entier, le nombre de répétitions totalisé depuis l'origine est arrondi à l'entier le plus voisin.

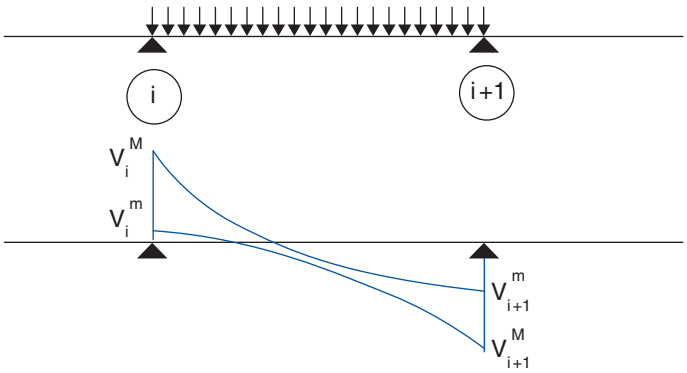
5/ Présentation des calculs :

s	$\frac{s_0}{2}$	s_1	s_2	...
Nombre théorique de répétitions		$l'_0 + \left(\frac{d}{s_0}\right)$	l'_0	
Nombre cumulé		$l'_0 + \left(\frac{d}{s_0}\right)$	$2.l'_0 + \left(\frac{d}{s_0}\right)$	
Nombre arrondi		m_1	m_2	
Nombre de répétitions		$n_1 = m_1$	$n_2 = m_2 - m_1$	
Abscisses	$\frac{s_0}{2}$	$\frac{s_0}{2} + n_1.s_1$	$\frac{s_0}{2} + n_1.s_1 + n_2.s_2$	

8.4 Cas des travées continues

8.4.1 Rappels de résistance des matériaux

La ligne enveloppe de l'effort tranchant dans une travée de poutre continue soumise à la seule action de charges réparties (hypothèse de la méthode Caquot) a l'allure suivante :



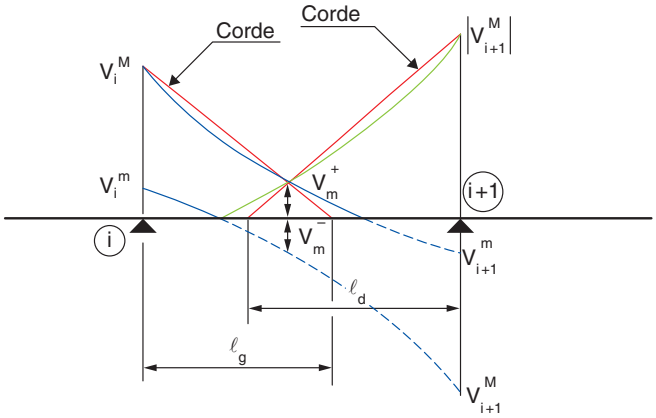
On pose pour tout appui j :

$$V_j^M = |V_j|^{Max}$$

$$V_j^m = |V_j|^{min}$$

8.4.2 Répartition des armatures d'âme

Pour l'étude de l'effort tranchant, on s'intéresse aux valeurs absolues de la ligne enveloppe :



$V_m = V_m^+ = |V_m^-|$ = valeur minimale de l'effort tranchant.

Par simplification, on remplace cette ligne théorique par la ligne enveloppe simplifiée constituée par les cordes :

- reliant V_i^M à V_m pour la partie gauche de la travée ;
- reliant V_m à $|V_{i+1}^M|$ pour la partie droite de la travée.

On définit ainsi les deux longueurs ℓ_g et ℓ_d.

On peut alors appliquer la méthode de répartition de Caquot en considérant les poutres fictives :

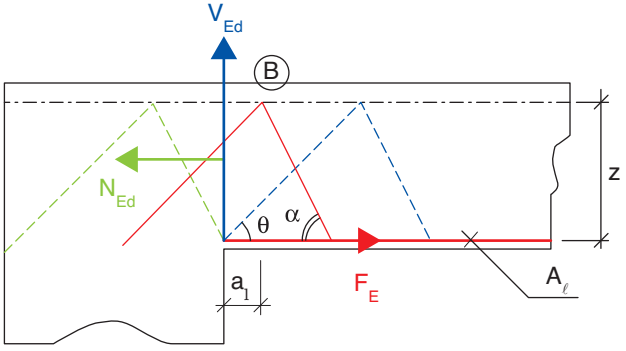
- de portée $\ell_n = 2.\ell_0 = 2.\ell_g$ associée à l'appui i ;
- de portée $\ell_n = 2.\ell_0 = 2.\ell_d$ associée à l'appui i + 1.

On fait la répartition en partant des deux extrémités de la travée continue.

9. Zones d'application des efforts

9.1 Armatures inférieures tendues sur appui simple d'about

9.1.1 Section d'armatures inférieures



L'équilibre des moments en B donne[71] :

$$V_{Ed}.a_1 = F_E.z \quad \Rightarrow \quad F_E = V_{Ed}\frac{a_1}{z}$$

Si, de plus, il existe en effort normal de calcul N_{Ed} :

$$F_E = |V_{Ed}|\frac{a_1}{z} + N_{Ed} \qquad \textbf{(9.3)}$$

Il faut donc :

$$A_s \geq \text{Max}\begin{cases} \dfrac{F_E}{f_{yd}} = \dfrac{|V_{Ed}|\dfrac{a_1}{z} + N_{Ed}}{f_{yd}} \\ \beta_2.A_1 \end{cases}$$

avec :

A_1 = section d'aciers longitudinaux en travée,

V_{Ed} = effort tranchant de calcul au nu d'appui,

N_{Ed} = effort normal de calcul (positif pour une traction),

$$a_1 = \frac{z\left(\text{cotg}\theta - \text{cotg}\alpha\right)}{2}$$

β_2 = 0,25 valeur recommandée ou fixée par l'Annexe nationale[72].

L'Annexe nationale française préconise β_2 = 0,0 avec la vérification suivante sur appui[73] :

$$A_s \geq \frac{F_E}{f_{yd}} = \frac{V_{Ed}\dfrac{a_1}{z} + N_{Ed} + \dfrac{M_{Ed}}{z}}{f_{yd}}$$

avec :

M_{Ed} = moment fléchissant concomitant (nul sur appui simple d'about).

Dans les cas courants :

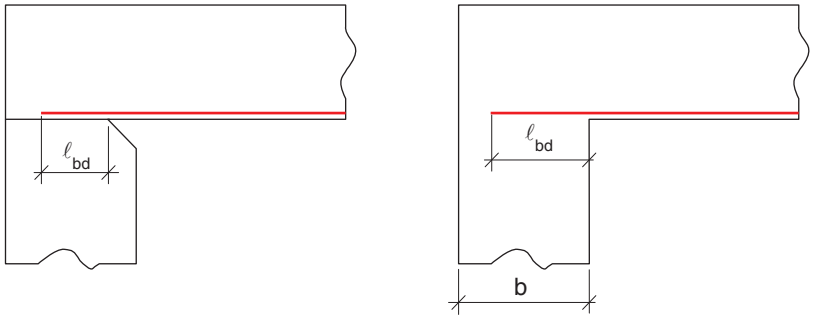
$$\left.\begin{array}{l} \theta = 45° \\ \alpha = 90° \\ z = 0,9.d \end{array}\right\} \quad \Rightarrow \quad a_1 = 0,45.d$$

71. EC 2 – 9.2.1.4 (1) & (2)
72. EC 2 – voir AN
73. EC 2 – AN

$$N_{Ed} = 0 \quad \Rightarrow \quad A_s \geq \text{Max} \begin{cases} 0{,}45 \dfrac{V_{Ed}}{f_{yd}} \\ \beta_2 . A_1 \end{cases} \text{ valeur recommandée,}$$

ou $N_{Ed} = 0 \quad \Rightarrow \quad A_s \geq 0{,}45 \dfrac{V_{Ed}}{f_{yd}} + \dfrac{M_{Ed}}{0{,}9.d.f_{yd}}$ pour l'Annexe nationale française.

9.1.2 Ancrage de l'armature inférieure sur un appui simple d'about



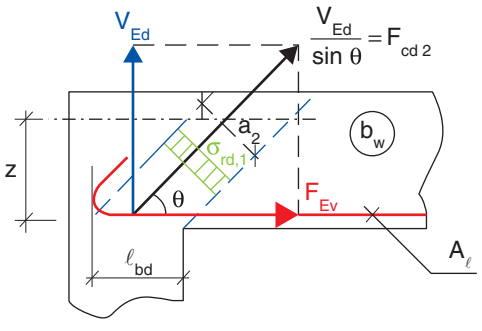
Appui direct

(poutre reposant sur un mur) ou un poteau

Appui indirect

(poutre encastrée dans une autre poutre[74])

9.2 Équilibre de la bielle de béton sur appui simple d'about[75]



74. EC 2 – 9.2.1.4 (3)
75. EC 2 – 6.5.4 (4b)

Inclinaison de la bielle d'about :

$$\sin\theta = \frac{z}{\sqrt{l_{bd}^2 + z^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{l_{bd}}{z}\right)^2}}$$

Largeur de la bielle d'about :

$a_2 = l_{bd}.\sin\theta$

Vérification de la contrainte de la bielle d'about :

$$\sigma_{Rd,\,1} = \frac{F_{cd2}}{a_2.b_w} = \frac{V_{Ed}}{l_{bd}.b_w.\sin^2\theta} \leq \sigma_{Rd,\,max} \qquad \textbf{(6.61)}$$

avec :

V_{Ed} = effort tranchant de calcul au nu d'appui,

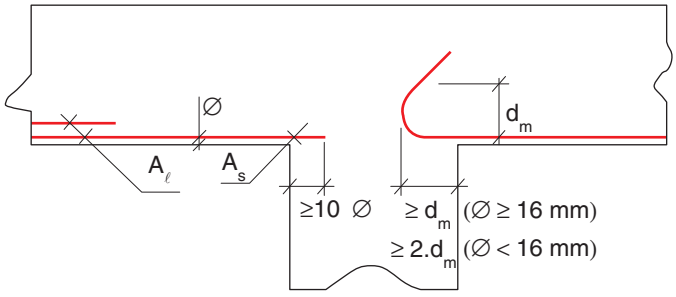
$\sigma_{Rd,\,max} = k_2.\nu'.f_{cd}$ où $k_2 = 0{,}85$ valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française sans justification spéciale[76],

et en se plaçant en sécurité par rapport aux résultats d'essais[77] :

$$\nu' = 1 - \frac{f_{ck}}{250} \quad \text{avec} \quad f_{ck} \text{ en MPa,} \qquad \textbf{(6.57N)}$$

valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[78].

9.3 Armature inférieure tendue sur appui intermédiaire[79]



d_m = diamètre du mandrin de cintrage.

76. EC 2 – voir AN
77. EC 2 – 6.2.2 (6)
78. EC 2 – voir AN
79. EC 2 – 9.2.1.5

Section d'armatures :

$$\boxed{A_s \geq \beta_2 . A_1}$$

avec :

A_1 = section d'armatures longitudinales en travée[80],

$\beta_2 = \frac{1}{4}$: valeur recommandée ou fixée par l'Annexe nationale[81].

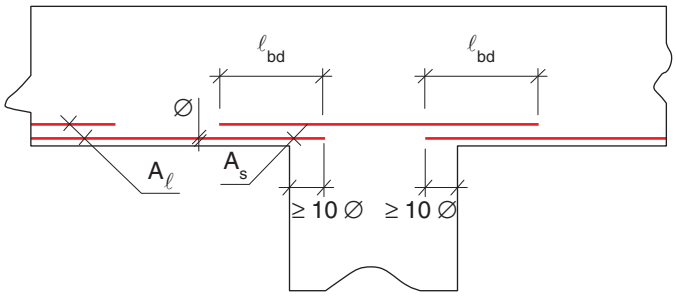
L'Annexe nationale française préconise $\beta_2 = 0{,}0$ avec la vérification suivante sur appui :

$$\boxed{A_s \geq \frac{F_E}{f_{yd}} = \frac{V_{Ed}\frac{a_1}{z} + N_{Ed} + \frac{M_{Ed}}{z}}{f_{yd}}}$$ [82]

avec :

M_{Ed} = moment fléchissant concomitant.

Prévoir des barres « couvre-joints » pour résister aux moments positifs imprévus (tassements d'appuis, explosions, etc.).

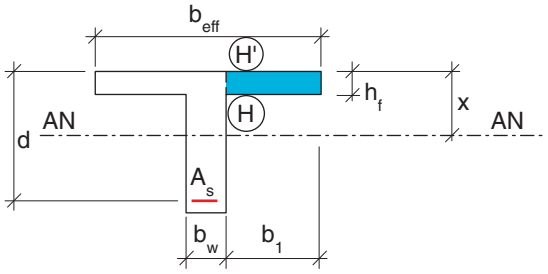


10. Jonction hourdis-nervure

10.1 Introduction

Lorsque $M_{Ed} > 0$, l'effort normal dans une aile de section en T vaut (voir § 1.1.1) :[83]

80. EC 2 – 9.2.1.4 (1)
81. EC 2 – voir AN
82. EC 2 – AN
83. EC 2 – 6.2.4



$$F_d = \frac{M_{Ed}}{I_1} S_B = \frac{M_{Ed}}{z} . \frac{S_B}{S_1} = \frac{M_{Ed}}{z} . \frac{\frac{b_{eff} - b_w}{2} h_f \left(x - \frac{h_f}{2} \right)}{S_1} \quad \text{car } z = \frac{I_1}{S_1}$$

I_1 = moment d'inertie par rapport à l'axe neutre de la section homogène réduite.

Or, le moment statique S_1 de la partie comprimée de la section en T est tel que :

$S_1 \geq b_{eff} . h_f \left(x - \frac{h_f}{2} \right)$ puisque l'axe neutre est dans la nervure.

On en déduit :

$$h_f \left(x - \frac{h_f}{2} \right) \leq \frac{S_1}{b_{eff}}$$

d'où :

$$F_d \leq \frac{M_{Ed}}{z} . \frac{b_{eff} - b_w}{2.b_{eff}}$$

Comme $M_{Ed} = F_{sc} . z$, il vient :

$$F_d \leq F_{sc} \frac{b_{eff} - b_w}{2.b_{eff}}$$

Il en résulte que la variation d'effort normal dans une aile entre deux sections droites distantes de Δx est telle que :

$$\Delta F_d \leq \Delta F_{sc} \frac{b_{eff} - b_w}{2.b_{eff}}$$

Dans le cas où $M_{Ed} < 0$, nous avons $S_B = A_{s1}$ et $S_1 = A_s$, avec :

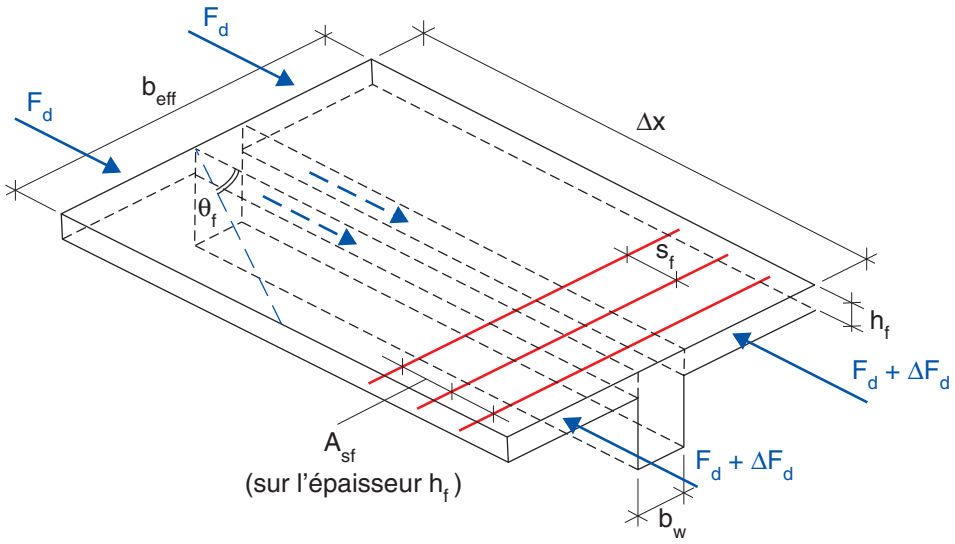
A_{s1} = section des barres longitudinales situées dans une saillie de la table,

A_s = section de l'ensemble des barres longitudinales situées dans la table,

d'où :

$\Delta F_d \leq \Delta F_s \frac{A_{s1}}{A_s}$ (en remplaçant F_{sc} par F_s).

La variation totale de la force de compression (ou de traction) dans la partie de table en débord, entre deux sections droites distantes de Δx, vaut :



$$\Delta F_d = \Delta F \frac{b_{eff} - b_w}{2.b_{eff}} \quad \text{si } M_{Ed} > 0$$

$$\Delta F_d = \Delta F \frac{A_{s1}}{A_s} \quad \text{si } M_{Ed} < 0$$

avec :

ΔF = variation, entre deux sections distantes de Δx, de l'effort de compression s'exerçant dans la zone comprimée de la section droite (ou de l'effort de traction agissant dans les armatures tendues si $M_{Ed} < 0$),

A_s = section totale des armatures longitudinales tendues supérieures,

A_{s1} = section des armatures longitudinales tendues situées dans une saillie de la table.

L'effort de glissement moyen par unité de longueur est défini par :

$$g_{Ed} = \frac{\Delta F_d}{\Delta x}$$

Δx = demi-distance du point de moment nul au point de moment maximal (positif ou négatif) ou distance entre points d'application des charges concentrées[84].

84. EC 2 – 6.2.4 (3)

La contrainte tangente correspondante à la jonction table/nervure vaut :

$$v_{Ed} = \frac{g_{Ed}}{h_f} \Rightarrow \boxed{v_{Ed} = \frac{\Delta F_d}{h_f . \Delta x}} \quad \textbf{(6.20)}$$

La résistance au cisaillement de la partie de table en débord peut être calculée en assimilant cette membrure à un système triangulé composé :

- de bielles de compression inclinées d'un angle θ_f sur l'axe de la poutre ;
- de tirants correspondant aux armatures tendues perpendiculaires à l'axe de la poutre.

10.2 Vérification de la compression des bielles de béton

L'équation [8.5] donne la contrainte tangente correspondant à l'effort tranchant $V_{Rd,\ max}$ qui provoque l'écrasement des bielles de béton :

$$v_{Rd,\ max} = \frac{V_{Rd,\ max}}{b_w . z} = \nu . f_{cd} \frac{\cot g\theta_f + \cot g\alpha}{1 + \cot g^2 \theta_f}$$

comme les armatures de couture sont perpendiculaires à l'âme : $\alpha = 90^\circ$ et :

$$v_{Ed} = v_{Rd,\ max} = \nu . f_{cd} \frac{\cot g\theta_f}{1 + \cot g^2 \theta_f} = \nu . f_{cd} \frac{1}{\frac{1}{\cot g\theta_f} + \cot g\theta_f}$$

$$v_{Ed} = \nu . f_{cd} \frac{1}{\frac{\sin\theta_f}{\cos\theta_f} + \frac{\cos\theta_f}{\sin\theta_f}}$$

$$v_{Ed} = \nu . f_{cd} \frac{1}{\frac{\sin^2\theta_f + \cos^2\theta_f}{\sin\theta_f . \cos\theta_f}} = \nu . f_{cd} . \sin\theta_f . \cos\theta_f$$

D'où la vérification de la compression des bielles[85] :

$$\boxed{v_{Ed} \le \nu . f_{cd} . \sin\theta_f . \cos\theta_f} \quad \textbf{(6.22)}$$

avec, comme valeurs recommandées et à utiliser pour l'Annexe nationale française[86] :

$1 \le \cot g\theta_f \le 2$ dans les membrures comprimées $\left(26,5^\circ \le \theta_f \le 45^\circ\right)$,

$1 \le \cot g\theta_f \le 1,25$ dans les membrures tendues $\left(38,6^\circ \le \theta_f \le 45^\circ\right)$,

85. EC 2 – 6.2.4 (4)
86. EC 2 – voir AN

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

ν = coefficient donné au § 3.3.1.

Dans le cas des ponts, il convient de réduire la valeur de h_f de la profondeur de la zone comprimée par la flexion transversale. Dans le cas où cette vérification n'est pas satisfaite, les Règles EC 2, partie 2 indiquent une méthode plus précise basée sur une modélisation en plaque de type « sandwich »[87].

10.3 Armatures de couture

Vérification de l'effort de traction dans les armatures de liaison de l'âme à la membrure[88] :

- la seconde équation [8.3] de la règle des coutures s'écrit :

$$\rho_w . \sigma_{sw} = \frac{v_R}{\sin^2 \alpha \left(\text{cotg}\theta_f + \text{cotg}\alpha\right)} \text{ où : } v_R = v_{Ed}$$

avec :

$$\left.\begin{array}{l} \rho_w = \dfrac{A_{sf}}{s_f . h_f . \sin\alpha} \\ \alpha = 90° \\ \sigma_{sw} = f_{yd} = \dfrac{f_{yk}}{\gamma_s} \end{array}\right\} \Rightarrow \frac{A_{sf}}{s_f} f_{yd} = \frac{h_f . v_{Ed}}{\text{cotg}\theta_f}$$

- les armatures de liaison sont alors obtenues en écrivant :

$$\boxed{\frac{A_{sf}}{s_f} \geq \frac{v_{Ed} . h_f}{f_{yd} . \text{cotg}\theta_f}} \qquad \textbf{(6.21)}$$

avec :

h_f = épaisseur de la table,

A_{sf} = section d'un cours d'armatures de liaison,

s_f = espacement de ces armatures.

A_{sf} est en général constitué par les armatures d'une dalle fléchie entre deux nervures parallèles. Si[89] :

$$\boxed{v_{Ed} \leq k . f_{ctd}}$$

87. EC 2 – 6.2.4 (105) + annexe MM
88. EC 2 – 6.2.4 (4)
89. EC 2 – 6.2.4 (6)

avec[90] :

$$k = \begin{cases} 0{,}4 : \text{valeur recommandée,} \\ \text{et pour l'Annexe nationale française :} \\ 0{,}50 : \text{surface verticale de reprise de bétonnage rugueuse,} \\ 1{,}00 : \text{absence de surface verticale de reprise de bétonnage,} \end{cases}$$

il n'est pas nécessaire de compléter les armatures de flexion de la dalle entre ces deux nervures parallèles.

Dans le cas contraire, la section des armatures de la dalle doit être telle que[91] :

$$\frac{A_{sf}}{s_f} \geq \text{Max} \begin{cases} \dfrac{v_{Ed}.h_f}{f_{yd}.\text{cotg}\theta_f} \\ \dfrac{1}{2}.\dfrac{v_{Ed}.h_f}{f_{yd}.\text{cotg}\theta_f} + \dfrac{A_{s,\,sup} + A_{s,\,inf}}{s_f} \end{cases}$$

avec $A_{s,\,sup}$ et $A_{s,\,inf}$, aciers supérieurs et inférieurs de la dalle, espacés de s_f et ancrés de part et d'autre des sections de jonction HH' (voir première figure du § 10.1).

Remarque 1 – Règle des coutures

Pour $\theta_f = 45°$, on a $\dfrac{A_{sf}}{s_f} f_{yd} \geq h_f.v_{Ed} = g_{Ed}$.

On peut donc retenir ce résultat simple : « La force développée par unité de longueur par les aciers de couture doit équilibrer le glissement longitudinal ultime par unité de longueur. »

Remarque 2 – Influence de la largeur de la table

Le glissement moyen vaut :

$$g_{Ed,\,moy} = \Delta F \frac{\dfrac{b_{eff} - b_w}{2}}{b_{eff}}.\frac{1}{\Delta x}$$

d'où la contrainte tangente moyenne dans la table :

$$v_{Ed,\,moy} = \frac{g_{Ed,\,moy}}{h_f}$$

D'après la seconde équation [8.3], nous avons :

$$\rho_w.\sigma_{sw} = \frac{v_{Ed,\,moy}}{\sin^2\alpha\left(\text{cotg}\theta_f + \text{cotg}\alpha\right)}$$

90. EC 2 – voir AN
91. EC 2 – 6.2.4 (5)

avec :

$$\left.\begin{array}{l}\rho_w = \dfrac{A_{sf}}{s_f . h_f . \sin\alpha} \\ \alpha = 90° \\ \sigma_{sw} = f_{yd} = \dfrac{f_{yk}}{\gamma_s}\end{array}\right\} \Rightarrow \frac{A_{sf}}{s_f} . \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{h_f . v_{Ed,\,moy}}{\cot g\theta_f}$$

Les armatures de la table doivent vérifier :

$$\frac{A_{sf}}{s_f} . \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \cot g\theta_f \geq v_{Ed,\,moy} . h_f = g_{Ed,\,moy}$$

Si cette condition n'est pas vérifiée, il faut réduire $g_{Ed,\,moy}$, donc $\frac{b_{eff} - b_w}{2}$ (largeur d'une saillie de la table) de manière à ce que, pour une section en T symétrique :

$$\frac{1}{\Delta x}\Delta F \frac{\frac{b_{eff} - b_w}{2}}{\underbrace{2\frac{b_{eff} - b_w}{2} + b_w}_{b_{eff}}} \leq \frac{A_{sf}}{s_f} . \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \cot g\theta_f = g_{Ed,\,moy}$$

d'où la largeur de la saillie à considérer :

$$\frac{b_{eff} - b_w}{2} \leq \frac{b_w . g_{Ed,\,moy}}{\frac{\Delta F}{\Delta x} - 2 . g_{Ed,\,moy}}$$

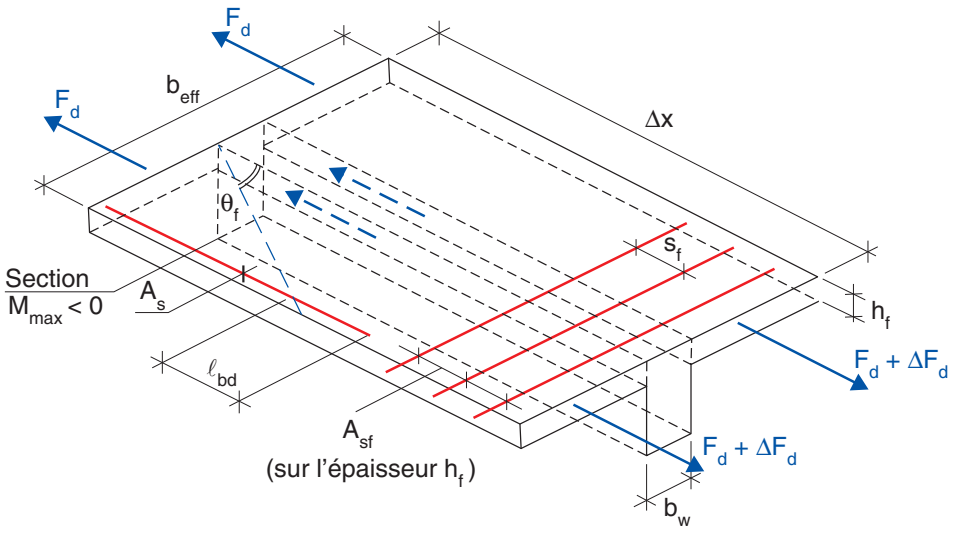
Il faut alors reprendre le calcul des armatures longitudinales de la poutre en adoptant pour largeur de la table la valeur correspondant à la nouvelle largeur de saillie $\frac{b_{eff} - b_w}{2}$ retenue.

Comme on a réduit la largeur de la table à prendre en compte, on a augmenté corrélativement la section des armatures longitudinales en travée.

10.4 Ancrage des armatures longitudinales supérieures tendues

Si $M_{max} < 0$, les armatures longitudinales tendues doivent être ancrées au-delà de la bielle destinée à transmettre l'effort à l'âme en partant de l'appui[92] :

92. EC 2 – 6.2.4 (7)



10.5 Interaction entre effort tranchant et flexion transversale pour les ponts

Les âmes des sections de poutres-caissons sont soumises à des champs de contraintes en compression résultant de l'interaction entre l'effort tranchant longitudinal et la flexion transversale.

En désignant par :

$V_{Rd,\ max}$ = résistance maximale des âmes vis-à-vis de l'effort tranchant,

$M_{Rd,\ max}$ = résistance maximale des âmes vis-à-vis de la flexion transversale,

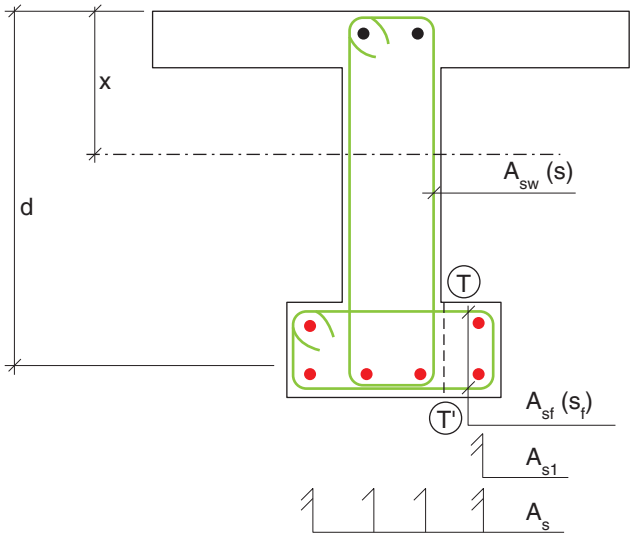
nous avons deux cas possibles :

- si $\dfrac{V_{Ed}}{V_{Rd,\ max}} < 0,2$ ou $\dfrac{M_{Ed}}{M_{Rd,\ max}} < 0,1$, l'interaction peut être négligée ;
- dans le cas contraire, les Règles EC 2, partie 2 indiquent une méthode plus précise basée sur une modélisation de type « sandwich »[93].

93. EC 2 - 6.2.106 (101) + annexe MM

11. Poutres à talon

Il s'agit de poutres en T dont l'âme est élargie au niveau des armatures tendues.



Notations :

A_{s1} = section des barres longitudinales situées dans une saillie du talon,

A_s = section de l'ensemble des barres longitudinales situées dans le talon,

A_{sf} = section d'une nappe d'aciers de couture (cadres de talon),

s_f = équidistance de ces nappes.

L'effort de glissement par unité de longueur du plan TT' vaut :

$$g_{Ed} = \frac{\Delta F_d}{\Delta x} = \Delta F \frac{A_{s1}}{A_s} . \frac{1}{\Delta x}$$

avec :

ΔF = variation, entre deux sections distantes de Δx, de l'effort de traction des armatures longitudinales,

Δx = demi-distance du point de moment nul au point de moment maximal.

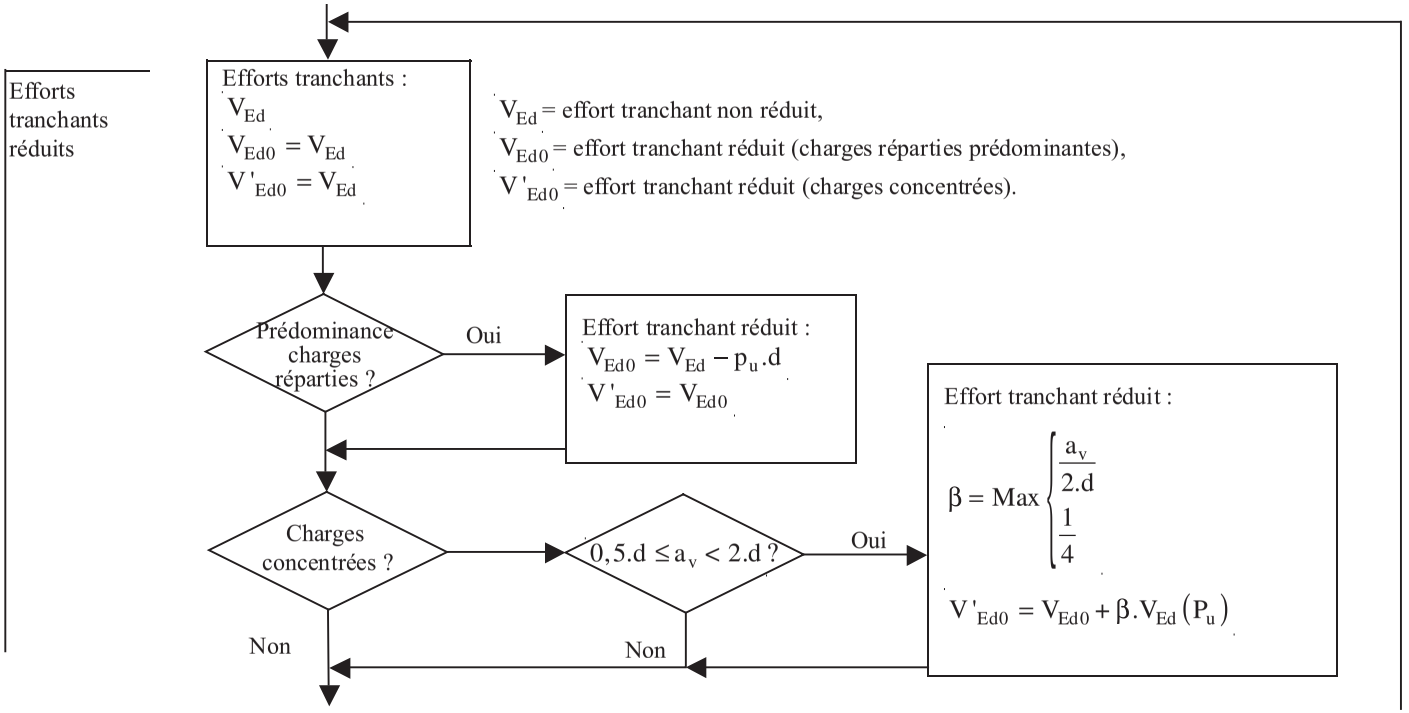
Armatures de liaison :

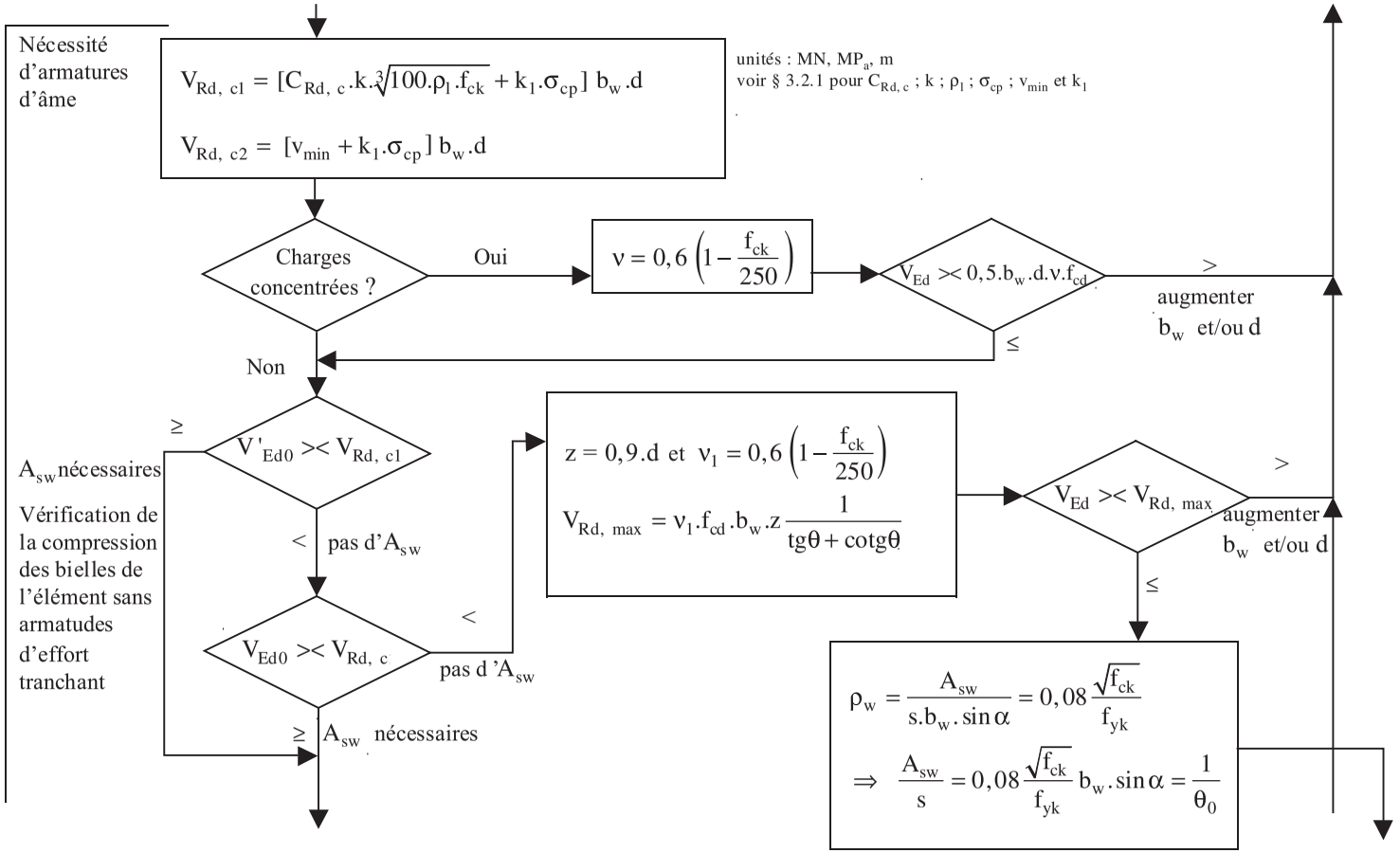
$$g_{Ed} = v_{Ed} . h_f \leq \frac{A_{sf}}{s_f} f_{yd} . \cot g\theta_f \quad \Rightarrow \quad \frac{A_{sf}}{s_f} \geq \frac{g_{Ed}}{f_{yd} . \cot g\theta_f}$$

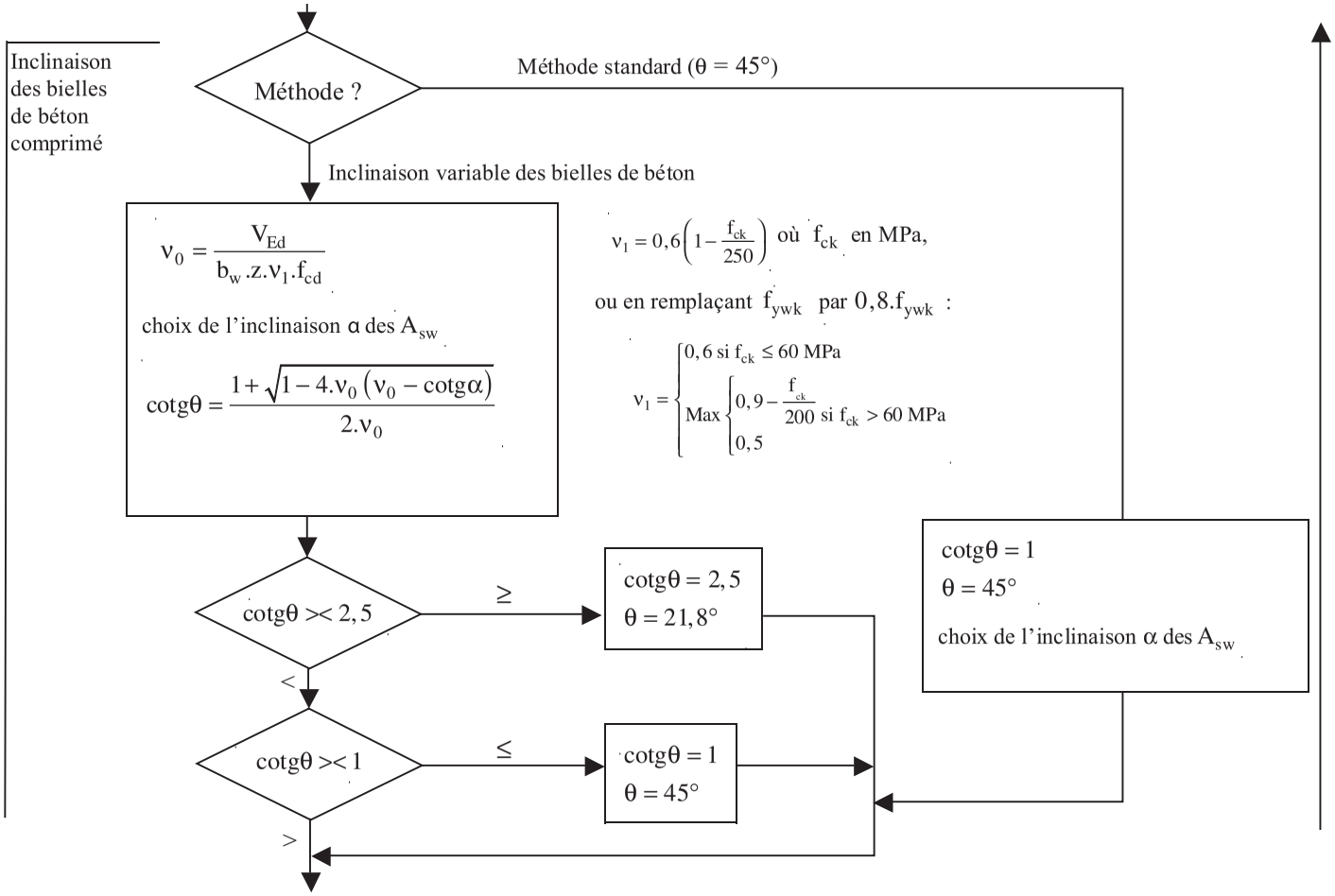
soit, si l'on adopte le même espacement pour les armatures de liaison et les armatures d'effort tranchant :

$$\frac{A_{sf}}{s} \geq \frac{g_{Ed}}{f_{yd} . \cot g\theta_f}$$

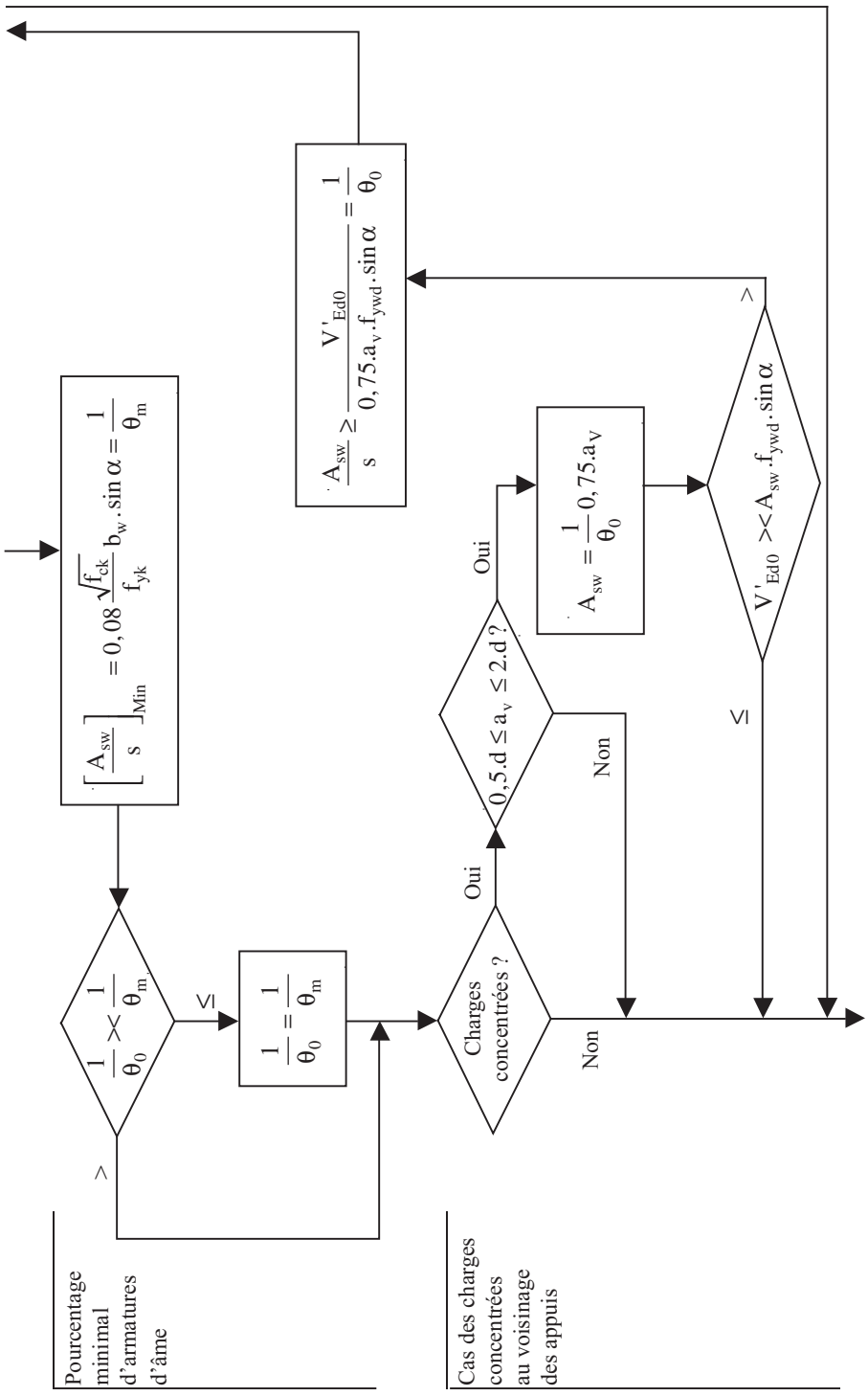
12. Organigramme récapitulatif pour le calcul des armatures d'âme

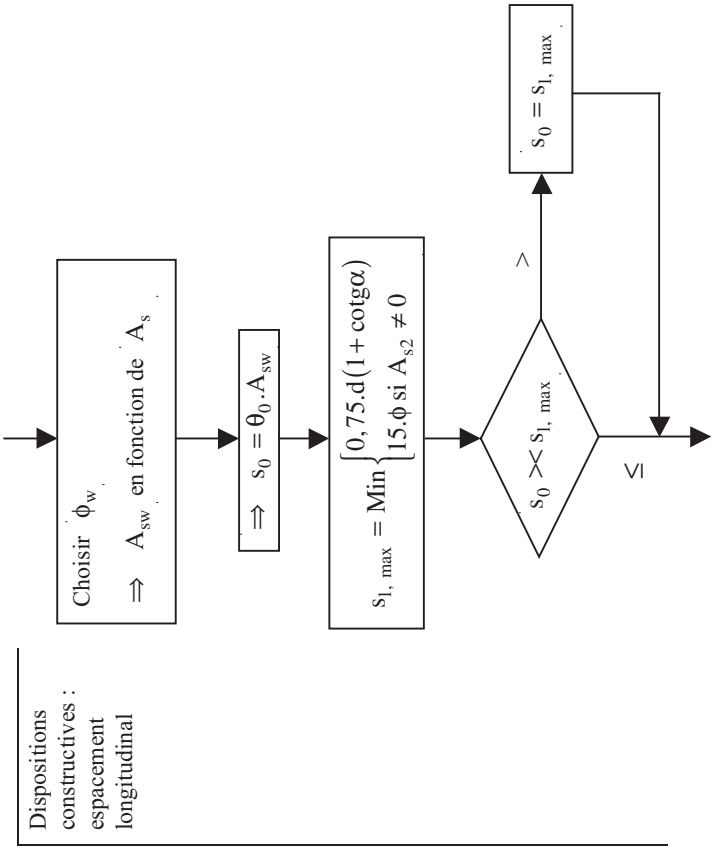


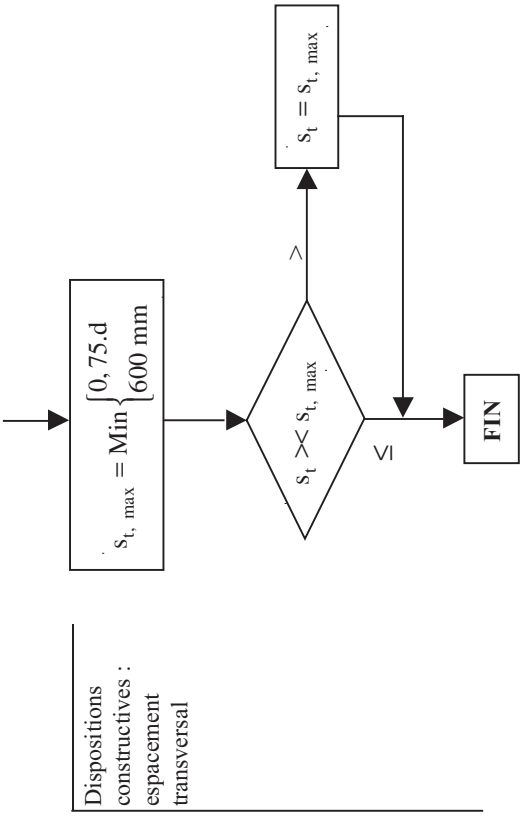

Nécessité d'armatures d'âme
$V_{Rd,\,c1} = [C_{Rd,\,c}.k.\sqrt[3]{100.\rho_l.f_{ck}} + k_1.\sigma_{cp}]\ b_w.d$
$V_{Rd,\,c2} = [v_{min} + k_1.\sigma_{cp}]\ b_w.d$
unités : MN, MP_a, m
voir § 3.2.1 pour $C_{Rd,\,c}$; k ; ρ_l ; σ_{cp} ; v_{min} et k_1
Charges concentrées ?
Oui
$\nu = 0,6\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$
$V_{Ed} >< 0,5.b_w.d.\nu.f_{cd}$
>
augmenter b_w et/ou d
≤
Non
≥
$V'_{Ed0} >< V_{Rd,\,c1}$
A_{sw} nécessaires
Vérification de la compression des bielles de l'élément sans armatudes d'effort tranchant
<
pas d'A_{sw}
$V_{Ed0} >< V_{Rd,\,c}$
<
pas d 'Asw
≥
A_{sw} nécessaires
$z = 0,9.d$ et $\nu_1 = 0,6\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$
$V_{Rd,\,max} = \nu_1.f_{cd}.b_w.z\frac{1}{tg\theta + cotg\theta}$
$V_{Ed} >< V_{Rd,\,max}$
>
augmenter b_w et/ou d
≤
$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s.b_w.\sin\alpha} = 0,08\frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}$
$\Rightarrow \frac{A_{sw}}{s} = 0,08\frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}b_w.\sin\alpha = \frac{1}{\theta_0}$


Inclinaison des bielles de béton comprimé
Méthode ?
Méthode standard (θ = 45°)
Inclinaison variable des bielles de béton
$\nu_0 = \frac{V_{Ed}}{b_w.z.\nu_1.f_{cd}}$
choix de l'inclinaison α des A_{sw}
$\cot g\theta = \frac{1+\sqrt{1-4.\nu_0\left(\nu_0-\cot g\alpha\right)}}{2.\nu_0}$
$\nu_1 = 0,6\left(1-\frac{f_{ck}}{250}\right)$ où f_{ck} en MPa,
ou en remplaçant f_{ywk} par $0,8.f_{ywk}$:
$\nu_1 = \begin{cases} 0,6 \text{ si } f_{ck} \le 60 \text{ MPa} \\ \text{Max}\begin{cases} 0,9-\frac{f_{ck}}{200} \text{ si } f_{ck} > 60 \text{ MPa} \\ 0,5 \end{cases} \end{cases}$
$\cot g\theta >< 2,5$
≥
$\cot g\theta = 2,5$
$\theta = 21,8°$
<
$\cot g\theta >< 1$
≤
$\cot g\theta = 1$
$\theta = 45°$
>
$\cot g\theta = 1$
$\theta = 45°$
choix de l'inclinaison α des A_{sw}

Vérification de la compression des bielles de béton
$V_{Rd,\,max} = b_w.z.\nu_1.f_{cd}\dfrac{\cot g\theta + \cot g\alpha}{1+\cot g^2\theta}$
$z = 0,9.d$
$V_{Ed} \gtrless V_{Rd,\,max}$
>
augmenter b_w et/ou d
≤
augmenter le coffrage
Armatures d'âme calculées
$\dfrac{A_{sw}}{s} \geq \dfrac{V'_{Ed0}}{0,9.d.f_{ywd}(\cot g\theta + \cot g\alpha)\sin\alpha} = \dfrac{1}{\theta_0}$
Pourcentage maximal d'armatures d'âme
$\left[\dfrac{A_{sw}}{s}\right]_{Max} = \dfrac{1}{2}\nu_1.f_{cd}.\dfrac{\sin\alpha}{1-\cos\alpha}.\dfrac{b_w}{f_{ywd}} = \dfrac{1}{\theta_M}$
$\dfrac{1}{\theta_0} \gtrless \dfrac{1}{\theta_M}$
>
augmenter le coffrage


$\left[\frac{A_{sw}}{s}\right]_{Min} = 0,08\frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} b_w . \sin\alpha = \frac{1}{\theta_m}$
$\frac{1}{\theta_0} > < \frac{1}{\theta_m}$
>
≤
$\frac{1}{\theta_0} = \frac{1}{\theta_m}$
Pourcentage minimal d'armatures d'âme
Charges concentrées ?
Oui
Non
$0,5.d \le a_v \le 2.d$?
Oui
Non
$A_{sw} = \frac{1}{\theta_0} 0,75.a_V$
$V'_{Ed0} > < A_{sw} . f_{ywd} . \sin\alpha$
>
≤
$\frac{A_{sw}}{s} \ge \frac{V'_{Ed0}}{0,75.a_v . f_{ywd} . \sin\alpha} = \frac{1}{\theta_0}$
Cas des charges concentrées au voisinage des appuis


Dispositions constructives : espacement longitudinal
Choisir ϕ_w
$\Rightarrow$ A_{sw} en fonction de A_s
$\Rightarrow$ $s_0 = \theta_0 . A_{sw}$
$s_{l,\,max} = \mathrm{Min}\begin{cases} 0,75.d(1+\cot g\alpha) \\ 15.\phi \text{ si } A_{s2} \neq 0 \end{cases}$
$s_0 < s_{l,\,max}$
>
$s_0 = s_{l,\,max}$
≤


Dispositions constructives : espacement transversal
$s_{t,\,max} = \text{Min}\begin{cases} 0,75.d \\ 600\ \text{mm} \end{cases}$
$s_t \gtrless s_{t,\,max}$
>
$s_t = s_{t,\,max}$
≤
FIN

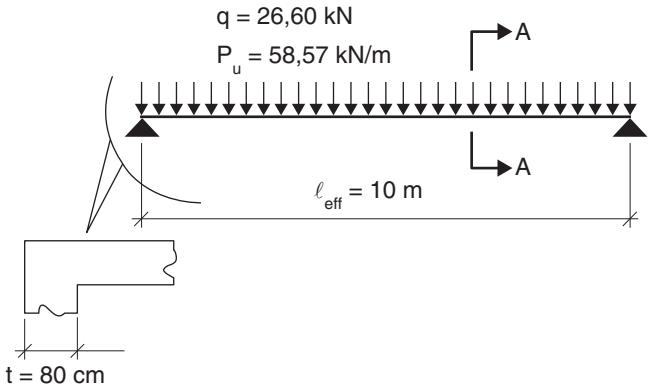
II. APPLICATIONS

Application n° 1 : armatures d'effort tranchant – charges réparties

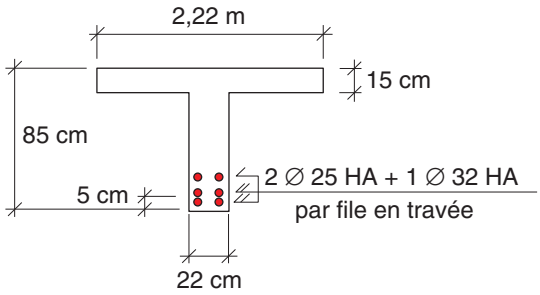
–Énoncé–

On considère la poutre figurée ci-dessous :

ÉLÉVATION



COUPE AA



Enrobage des armatures : c_{nom} = 3 cm. Reprise horizontale de bétonnage à la jonction âme /hourdis.

Matériaux :

- béton : f_{ck} = 25 MPa ;
- aciers : S 500.

On se propose :

1/ de calculer les armatures d'âme :
   – par la méthode des bielles d'inclinaison variable ;

– pour une inclinaison des bielles : $\theta = 45^\circ$ (méthode standard) ;

2/ de vérifier les abouts de la poutrelle pour une inclinaison des bielles : $\theta = 45^\circ$,

3/ de vérifier la jonction hourdis-nervure.

–Corrigé–

1. Effort tranchant

1.1 Effort tranchant maximal

À l'axe de l'appui :

$$V_{Ed,\ eff} = \frac{p_u . l_{eff}}{2} \qquad V_{Ed,\ eff} = \frac{58,57.10,00}{2} = 292,9 \text{ kN}$$

Au nu d'appui :

(voir § 2.3, chapitre 1 : « Analyse structurale », *Maîtrise de l'eurocode 2*, J. Roux, Éditions Eyrolles, 2009)

$$\text{Poutre isostatique} \Rightarrow \quad a = \text{Min}\begin{cases}\frac{1}{2}t\\ \frac{1}{2}h\end{cases} \qquad a = 0,40 \text{ m} = \text{Min}\begin{cases}\frac{1}{2}0,80 = 0,40 \text{ m}\\ \frac{1}{2}0,85 = 0,425 \text{ m}\end{cases}$$

$$V_{Ed} = V_{Ed,\ eff} - p_u . a \qquad V_{Ed} = 292,9 - 58,57.0,40 = 269,47 \text{ kN}$$

1.2 Effort tranchant réduit (transmission directe des charges aux appuis)

Charges uniformément réparties.

Effort tranchant à la distance d du nu d'appui :

$$V_{Ed0} = V_{Ed,\ eff} - p_u\,(a + d) \qquad V_{Ed0} = 292,9 - 58,57\,(0,40 + 0,80) = 222,62 \text{ kN}$$

2. Nécessité de mettre des armatures d'effort tranchant

2.1 Effort tranchant résistant de calcul de l'élément sans armatures d'âme : $V_{Rd,c}$

$$f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad \Rightarrow \quad f_{ctm} = 0,3\left[f_{ck}\right]^{2/3} \qquad f_{ctm} = 0,3\left[25\right]^{2/3} = 2,56 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk,\ 0,05} = 0,7.f_{ctm} \qquad f_{ctk,\ 0,05} = 0,7.2,56 = 1,79 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = \alpha_{ct}\frac{f_{ctk,\ 0,05}}{\gamma_c} \qquad f_{ctd} = 1\frac{1,79}{1,5} = 1,19 \text{ MPa}$$

$f_{cd} = \alpha_{cc} \dfrac{f_{ck}}{\gamma_c}$ $\qquad$ $f_{cd} = 1 \dfrac{25}{1,5} = 16,7$ MPa

A_{sl} = aire de l'armature longitudinale dans la section distante de $d + l_{bd}$ de celle étudiée : $\qquad$ $A_{sl} = 2.8,04 = 16,08$ cm^2 (lit inférieur de 2 ϕ 32 : voir § 5.1).

$\rho_l = \dfrac{A_{sl}}{b_w.d} \not> 2\ \%$ $\qquad$ $\rho_l = \dfrac{16,08}{22.80} = 0,009 < 2\ \%$

N_{Ed} = effort normal $\qquad$ $N_{Ed} = 0$ (flexion simple)

$\sigma_{cp} = \dfrac{N_{Ed}}{A_c}$ $\qquad$ $\sigma_{cp} = 0$

Effort tranchant pouvant être supporté sans armatures d'âme :

$$V_{Rd,\ c} = \text{Max} \begin{cases} \left[C_{Rd,\ c}.k.\sqrt[3]{100.\rho_l.f_{ck}} + k_1.\sigma_{cp} \right] b_w.d = V_{Rd,\ c1} \\ \left[v_{min} + k_1.\sigma_{cp} \right] b_w.d = V_{Rd,\ c2} \end{cases}$$

avec :

$C_{Rd,\ c} = \dfrac{0,18}{\gamma_c}$ $\qquad$ $C_{Rd,\ c} = \dfrac{0,18}{1,5} = 0,12$

$k = \text{Min} \begin{cases} 1 + \sqrt{\dfrac{200\ \text{mm}}{d}} \\ 2 \end{cases}$ $\qquad$ $k = 1,5 = \text{Min} \begin{cases} 1 + \sqrt{\dfrac{200}{800}} = 1,5 \\ 2 \end{cases}$

$\sigma_{cp} = \dfrac{N_{Ed}}{A_c} < 0,2.f_{cd}$ $\qquad$ $\sigma_{cp} = \dfrac{0}{A_c} = 0$ (flexion simple)

$k_1 = 0,15$ $\qquad$ $k_1 = 0,15$

$v_{min} = 0,035.k^{3/2}.\sqrt{f_{ck}}$ $\qquad$ $v_{min} = 0,035.1,5^{3/2}.\sqrt{25} = 0,321$

$$V_{Rd,\ c1} = \left[0,12.1,5\sqrt[3]{100 \frac{9}{1\,000} 25} + 0,15.0 \right] 0,22.0,80 = 0,089 \text{ MN}$$

$$V_{Rd,\ c2} = (0,321 + 0,15.0)\, 0,22.0,80 = 0,056 \text{ MN}$$

Remarque pour l'Annexe nationale française

$$v_{min} = \begin{cases} \frac{0,34}{\gamma_c}\sqrt{f_{ck}} : \text{dalles bénéficiant d'un effet de redistribution} \\ \qquad\qquad \text{transversale sous le cas de charge considéré,} \\ \frac{0,053}{\gamma_c}k^{3/4}\sqrt{f_{ck}} : \text{poutres et autres dalles,} \\ \frac{0,35}{\gamma_c}\sqrt{f_{ck}} : \text{voiles.} \end{cases}$$

Poutre $\Rightarrow$ $v_{min} = \frac{0,053}{\gamma_c}k^{3/2}.\sqrt{f_{ck}} = \frac{0,053}{1,5}1,5^{3/2}.\sqrt{25} = 0,321$

Soit la même valeur que celle recommandée par l'EC 2. ($\frac{0,053}{\gamma_c} = \frac{0,053}{1,5} = 0,035$)

2.2 Vérification

$V_{Ed0} >< V_{Rd,\,c1}$ $\qquad$ $V_{Ed0} = 0,223\ MN > 0,089\ MN = V_{Rd,\,c1}$

$V_{Ed0} >< V_{Rd,\,c2}$ $\qquad$ $V_{Ed0} = 0,223\ MN > 0,056\ MN = V_{Rd,\,c2}$

$\Rightarrow$ armatures d'effort tranchant calculées nécessaires

3. Armatures d'effort tranchant

3.1 Armatures d'effort tranchant calculées par la méthode des bielles d'inclinaison variable

3.1.1 Choix de l'inclinaison des bielles

$\nu_1 = 0,6\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$ (A_{sw} calculées pour f_{ywk}) $\quad \nu_1 = 0,6\left(1 - \frac{25}{250}\right) = 0,54$

$\nu_0 = \frac{V_{Ed}}{b_w.z.\nu_1.f_{cd}}$ $\qquad$ $\nu_0 = \frac{0,269}{0,22.0,9.0,80.0,54.16,7} = 0,188$

$z = 0,9.d$

En choisissant des armatures d'effort tranchant droites : $\alpha = 90^\circ$

$$\cot g\theta = \frac{1 + \sqrt{1 - 4.\nu_0\left(\nu_0 - \cot g\alpha\right)}}{2.\nu_0}$$

$$\cot g\theta = \frac{1 + \sqrt{1 - 4.0,188(0,188 - 0)}}{2.0,188} = 5,12$$

$1 \le \cot g\theta \le 2,5$ (valeur recommandée et à utiliser en flexion simple pour l'Annexe nationale française) : $\cot g\theta = 5,12 > 2,5$ $\Rightarrow$ Retenu $\boxed{\cot g\theta = 2,5}$.

3.1.2 Vérification de la compression des bielles de béton

Effort tranchant de calcul maximal pouvant être supporté sans provoquer l'écrasement des bielles de béton comprimé :

$$\begin{cases} V_{Rd,\ max} = b_w.z.\nu_1.f_{cd}\dfrac{\cot g\theta + \cot g\alpha}{1+\cot g^2\theta} \\ z = 0,9.d \end{cases}$$

$\alpha = 90^\circ$ en adoptant des armatures d'âme droites.

$$V_{Rd,\ max} = 0,22.0,9.0,80.0,54.16,7\frac{2,5+0}{1+2,5^2} = 0,493\ MN$$

$V_{Ed} >< V_{Rd,\ max}$ $\qquad$ $\boxed{V_{Ed} = 0,269\ MN < 0,493\ \ MN = V_{Rd,\ max}\ O.K.}$

3.1.3 Armatures d'effort tranchant

Calculées :

$f_{ywd} = \dfrac{f_{yk}}{\gamma_s}$ $\qquad$ $f_{ywd} = \dfrac{500}{1,15} = 435\ MPa$

α = inclinaison des A_{sw} $\qquad$ A_{sw} droites $\Rightarrow$ $\alpha = 90^\circ$

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{V_{Ed0}}{0,9.d.f_{ywd}\left(\cot g\theta + \cot g\alpha\right)\sin\alpha}$$

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{0,223}{0,9.0,80.435.(2,5+0)1}10^2 = \frac{1}{35,11}\ cm^2/cm$$

Maximales :

$$\frac{A_{sw}.f_{ywd}}{b_w.s} \leq \frac{\frac{1}{2}\nu_1.f_{cd}.\sin\alpha}{1-\cos\alpha} \qquad \frac{A_{sw}}{s} \leq \frac{\frac{1}{2}0,54.16,7.1}{435(1-0)}22 = \frac{1}{4,39}\ cm^2/cm$$

$$\boxed{\frac{A_{sw}}{s} = \frac{1}{35,11}\ cm^2/cm < \frac{1}{4,39}\ cm^2/cm = \left[\frac{A_{sw}}{s}\right]_{max}\ O.K.}$$

3.1.4 Pourcentage minimal

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s.b_w.\sin\alpha} \geq 0,08\frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}$$

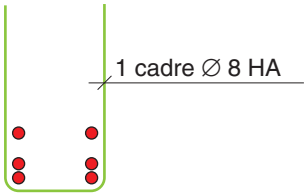
$a = 90°$ $\qquad$ $\Rightarrow \dfrac{A_{sw}}{s} \geq 0,08\dfrac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}b_w = 0,08\dfrac{\sqrt{25}}{500}22 = \dfrac{1}{56,82}\ cm^2/cm$

$$\boxed{\frac{A_{sw}}{s} = \frac{1}{35,11}\ cm^2/cm > \frac{1}{56,82}\ cm^2/cm\ O.K.}$$

3.1.5 Espacement

Prenons $\boxed{\phi_w = 8 \text{ mm}}$

d'où pour « coudre » deux files verticales :



$$A_{sw} = 2.0,5 = 1,00 \text{ cm}^2$$

$$\Rightarrow \quad s_0 = 1,00.35,11 = 35 \text{ cm}$$

Retenons : 1 cadre ϕ 8 HA : $s_0 = 35$ cm

- **3.1.5.1 Espacement longitudinal maximal**

$$s_{l,\,max} = \text{Min}\begin{cases} 0,75.d\left(1+\text{cotg}\alpha\right) \\ 15.\phi \text{ si } A_{s2} \neq 0 \end{cases} \qquad s_{l,\,max} = 0,60 \text{ m} = 0,75.0,80\left(1+0\right)$$

$s_0 >< s_{l,\,max}$ $\qquad \boxed{s_0 = 35 \text{ cm} < s_{l,\,max} = 60 \text{ cm} \quad \text{O.K.}}$

- **3.1.5.2 Espacement transversal maximal**

$$s_{t,\,max} = \text{Min}\begin{cases} 0,75.d \\ 600 \text{ mm} \end{cases} \qquad s_{t,\,max} = 0,60 \text{ m} = \text{Min}\begin{cases} 0,75.0,80 = 0,60 \text{ m} \\ 0,60 \text{ m} \end{cases}$$

$$s_t = b_w - 2\left(c_{nom} + \phi_t + \frac{\phi}{2}\right) \qquad s_t = 22 - 2\left(3 + 0,8 + \frac{3,2}{2}\right) = 11,2 \text{ cm}$$

$s_t >< s_{t,\,max}$ $\qquad \boxed{s_t = 11,2 \text{ cm} < s_{t,\,max} = 60 \text{ cm} \quad \text{O.K.}}$

3.2 Armatures d'effort tranchant calculées par la méthode standard ($\theta = 45^\circ$)

3.2.1 Vérification de la compression des bielles de béton

Effort tranchant de calcul maximal pouvant être supporté sans provoquer l'écrasement des bielles de béton comprimé :

$$\begin{cases} V_{Rd,\,max} = b_w.z.\nu_1.f_{cd}\,\dfrac{\text{cotg}\theta + \text{cotg}\alpha}{1+\text{cotg}^2\theta} \\ z = 0,9.d \end{cases}$$

$\alpha = 90^\circ$ en adoptant des armatures d'âme droites.

$$V_{Rd,\,max} = 0,22.0,9.0,80.0,54.16,7\,\frac{1+0}{1+1^2} = 0,714 \text{ MN}$$

$V_{Ed} >< V_{Rd,\ max}$ $\boxed{V_{Ed} = 0,269\ MN < 0,714\ MN = V_{Rd,\ max}\ \text{O.K.}}$

3.2.2 Armatures d'effort tranchant

Calculées :

α = inclinaison des A_{sw} $\quad A_{sw}$ droites $\Rightarrow \quad \alpha = 90°$

$\Rightarrow \quad \sin\alpha + \cos\alpha = 1$

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{V_{Ed0}}{0,9.d.f_{ywd}(\sin\alpha + \cos\alpha)} \qquad \frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{0,223}{0,9.0,80.435.1}10^2 = \frac{1}{14,04}\ cm^2/cm$$

Maximales :

$$\frac{A_{sw}.f_{ywd}}{b_w.d} \leq \frac{\frac{1}{2}\nu_1.f_{cd}.\sin\alpha}{1-\cos\alpha} \qquad \frac{A_{sw}}{s} \leq \frac{1}{4,39}\ cm^2/cm \ \text{(voir § 3.1.3)}$$

$$\boxed{\frac{A_{sw}}{s} = \frac{1}{14,04}\ cm^2/cm < \frac{1}{4,39}\ cm^2/cm = \left[\frac{A_{sw}}{s}\right]_{max}\ \text{O.K.}}$$

3.2.3 Pourcentage minimal

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s.b_w.\sin\alpha} \geq 0,08\frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \qquad \alpha = 90° \Rightarrow \frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{1}{56,82}\ cm^2/cm$$

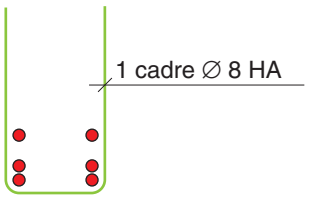
(*cf.* § 3.1.4)

$$\boxed{\frac{A_{sw}}{s} = \frac{1}{14,04}\ cm^2/cm > \frac{1}{56,82}\ cm^2/cm\ \text{O.K.}}$$

3.2.4 Espacement

Prenons ϕ_w = 8 mm

d'où pour « coudre » deux files verticales :



$A_{sw} = 2.0,5 = 1,00\ cm^2$

$\Rightarrow \quad s_0 = 1,00.14,04 = 14\ cm$

Retenons : 1 cadre ϕ 8 HA : $s_0 = 14$ cm

• 3.2.4.1 Espacement longitudinal maximal

$s_{l,\,max} = \text{Min}\begin{cases} 0,75.d\left(1+\text{cotg}\alpha\right) \\ 15.\phi \text{ si } A_{s2} \neq 0 \end{cases}$ $\quad s_{l,\,max} = 0,60$ m (voir § 3.1.5.1)

$s_0 >< s_{l,\,max}$ $\quad \boxed{s_0 = 14 \text{ cm} < s_{max} = 60 \text{ cm} \quad \text{O.K.}}$

• 3.2.4.2 Espacement transversal maximal

$s_{t,\,max} = \text{Min}\begin{cases} 0,75.d \\ 600 \text{ mm} \end{cases}$ $\quad s_{t,\,max} = 0,60$ m (voir § 3.1.5.2)

$s_t = b_w - 2\left(c_{nom} + \phi_t + \dfrac{\phi}{2}\right)$ $\quad s_t = 22 - 2\left(3 + 0,8 + \dfrac{3,2}{2}\right) = 11,2$ cm

$s_t >< s_{t,\,max}$ $\quad \boxed{s_t = 11,2 \text{ cm} < s_{t,\,max} = 60 \text{ cm} \quad \text{O.K.}}$

Remarque

Nous voyons bien sur cet exemple que, pour un tracé d'armatures d'âme (cadres, étriers, diamètre, inclinaison α) donné, la méthode des bielles d'inclinaison variable donne moins d'armatures transversales que la méthode standard (espacement 35 cm au lieu de 14 cm respectivement).

4. Répartition des armatures d'âme

Nous nous plaçons dans le cas des bielles inclinées à $\theta = 45°$.

Espacement initial s_1 $\quad s_0 = 14$ cm $\Rightarrow$ $s_1 = 13$ cm pris dans la suite des espacements s de Caquot.

Nombre de répétitions :

$l_{eff} = l_n + 2.a$ $\quad l_n = 10,00 - 2.0,40 = 9,20$ m

$l_0 = \dfrac{l_n}{2}$ (travée sur deux appuis simples) : $l_0 = \dfrac{9,20}{2} = 4,60$ m

$l'_0 = \left(l_0 - d\right)$ $\quad l'_0 = 4,60 - 0,80 = 3,80$ m

$n_1 = l'_0 + \dfrac{d}{s_0}$ pour le 1er espacement : $n_1 = 3,80 + \dfrac{0,80}{0,14} = 9,51$ pour le 1er espacement

$n_1 = l'_0$ pour les suivants : $\quad n_1 = 3,80$ pour $i > 1$

4.1 Tableau de Caquot

s	$\frac{s_0}{2}$	13	16	20	25	35
Nombre théorique	/	9,51	3,80	3,80	3,80	3,80
Nombre cumulé	/	9,51	13,31	17,11	20,91	24,71
Nombre arrondi	/	10	13	17	21	25
Nombre de répétitions	/	10	3	4	4	$4\ 2 \approx 2,7 = \frac{460-364}{35}$
Abscisses (cm)	6	136	184	264	364	504 434

Il manque pour arriver à mi-portée : 460 – 434 = 26 cm.

Retenons en mettant un cours d'armatures d'âme à mi-portée et en reclassant les espacements par ordre croissant :

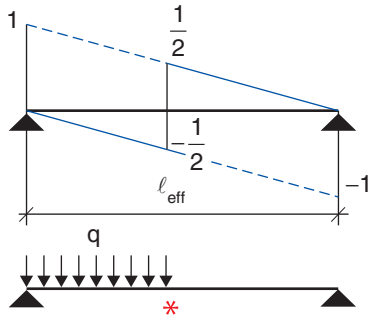
$$6 + 10.13 + 3.16 + 4.20 + 4.25 + 26 + 2.35$$

Nota : l'espacement est limité à $s_{l,\,max} = 60$ cm .

4.2 Vérification de s à $l_{eff}/2$

4.2.1 Effort tranchant

Compte tenu de la forme de la ligne d'influence de V :



$$\left.\begin{matrix}\text{Charges} \\ \text{permanentes}\end{matrix}\right\} \Rightarrow V_g = 0$$

$$\left.\begin{matrix}\text{Charges} \\ \text{variables}\end{matrix}\right\} \Rightarrow \begin{cases} V_p = \pm p\frac{1}{2}.\frac{1}{2}.\frac{l_{eff}}{2} = \pm\frac{p.l_{eff}}{8} \\ p = 1,5.q \end{cases}$$

$$V_{Ed} = \pm\frac{1,5.26,6.10,00}{8} = 49,9 \text{ kN}$$

4.2.2 Armatures transversales calculées

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{V_{Ed}}{0,9.d.f_{ywd}(\sin\alpha + \sin\alpha)} >< \left(\frac{A_{sw}}{s}\right)_{max}$$

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{0,050}{0,9.0,80.435.1}10^2 = \frac{1}{62,64} < \frac{1}{4,39} \text{ O.K.}$$

4.2.3 Pourcentage minimal

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s.b_w.\sin\alpha} \geq 0,08\frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \qquad \frac{A_{sw}}{s} = \frac{1}{62,64} < \frac{1}{56,82} = 0,018 \text{ cm}^2 / \text{cm}$$

Mais en réalité s = 35 cm, d'où :

$$\boxed{\frac{A_{sw}}{s} = \frac{2.0,50}{35} = 0,029 > 0,018 \text{ O.K.}}$$

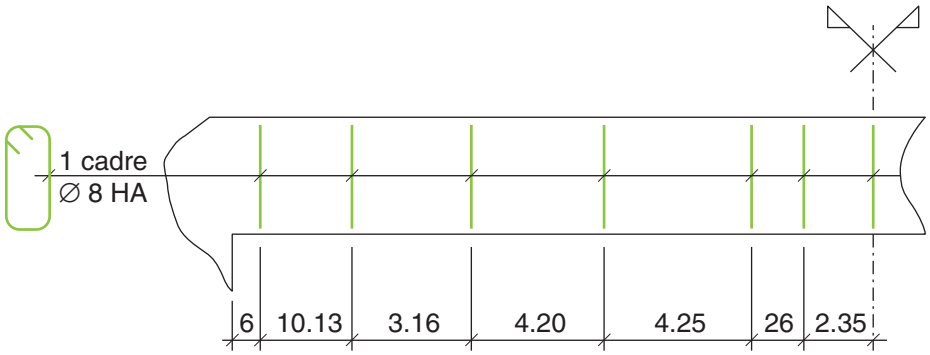
$\Rightarrow$ s = 35 cm à mi-portée convient.

4.2.4 Espacement maximal

$s_{l,\,max} = 0,75.d(1 + \text{cotg}\alpha)$ $\qquad$ $s_{l,\,max} = 0,60$ m (voir § 3.1.5.1)

$\boxed{s = 35 \text{ cm} < 60 \text{ cm} = s_{l,\,max} \text{ O.K.}}$

4.3 Retenu



5. Vérifications d'about

5.1 Armatures inférieures tendues sur appui d'about

5.1.1 Section d'acier inférieurs

Section :

θ $\qquad$ $\theta = 45^\circ$

z = 0,9.d

$a_l = \dfrac{z(\cot g\theta - \cot g\alpha)}{2}$ $\qquad a_l = \dfrac{0,9.0,80(1-0)}{2} = 0,36$ m

V_{Ed} $\qquad V_{Ed} = 0,269$ MN (au nu d'appui)

$f_{yd} = \dfrac{f_{yk}}{\gamma_s}$ $\qquad f_{yd} = \dfrac{500}{1,15} = 435$ MPa

A_l = section d'aciers longitudinaux en travée :

$$A_l = 2(2.4,91 + 8,04) = 35,72 \text{ cm}^2$$

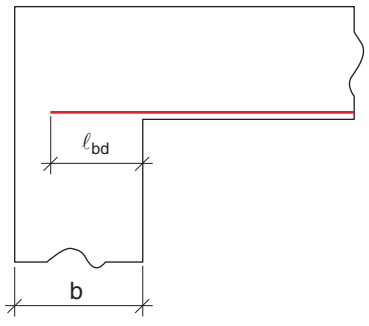
$$A_s \geq \text{Max}\begin{cases}\beta_2.A_l \text{ avec } \beta_2 = 0,25 \\ \dfrac{F_E}{f_{yd}} = \dfrac{V_{Ed}\dfrac{a_l}{z} + N_{Ed}}{f_{yd}}\end{cases}$$

$$A_s \geq 8,93 \text{ cm}^2 = \text{Max}\begin{cases}\dfrac{35,72}{4} = 8,93 \text{ cm}^2 \\ 0,269\dfrac{0,36}{\dfrac{0,9.0,80}{435}}10^4 + 0 = 3,09 \text{ cm}^2\end{cases}$$

Comme on avait deux files de 2 ϕ 25 HA + 1 ϕ 32 HA en travée, on garde 2 ϕ 32 HA inférieurs sur appui :

$$A_s = 2.8,04 = 16,08 \text{ cm}^2$$

ancrés au-delà du nu d'appui sur :



Remarque pour l'Annexe nationale française

$$A_s \geq \frac{F_E}{f_{yd}} = \frac{V_{Ed}\dfrac{a_l}{z} + N_{Ed} + \dfrac{M_{Ed}}{z}}{f_{yd}}$$

$$A_s \geq \frac{0,269\frac{0,36}{0,9.0,80} + 0 + \frac{0}{0,9.0,80}}{435} 10^4 = 3,09 \text{ cm}^2$$

Soit la valeur recommandée par les Règles EC 2. Donc : 2 ϕ 32 HA inférieurs sur appui.

5.1.2 Ancrage des aciers inférieurs

Contrainte ultime d'adhérence :

$f_{bd} = 2,25.\eta_1.\eta_2.f_{ctd}$

avec :

$$\eta_1 = \begin{cases} 1 : \text{bonnes conditions d'adhérence,} \\ 0,7 : \text{conditions d'adhérence médiocres,} \end{cases}$$

h = 85 cm > 600 mm et armatures longitudinales inférieures

⇒ bonnes conditions d'enrobage

⇒ $\eta_1 = 1$

$$\eta_2 = \begin{cases} 1 : \phi \leq 32 \text{ mm,} \\ \frac{132 - \phi}{100} : \phi > 32 \text{ mm.} \end{cases}$$

$\phi \leq 32$ mm ⇒ $\eta_2 = 1$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,\ 0,05}}{\gamma_c}$$

$f_{ctd} = 1,19$ MPa (voir § 2.1)

$f_{bd} = 2,25.1.1.1,19 = 2,68$ MPa

Longueur d'ancrage de référence :

$$l_{b,\ rqd} = \frac{\phi}{4}.\frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

avec :

$$F_E = |V_{Ed}|\frac{a_1}{z} + N_{Ed}$$

$\sigma_{sd} = \frac{F_E}{A}$ = contrainte de calcul à l'origine de l'ancrage :

$$\sigma_{sd} = \frac{0,269\frac{0,36}{0,9.0,80} + 0}{16,08.10^{-4}} = 84 \text{ MPa}$$

$$l_{b,\ rqd} = \frac{\phi}{4}.\frac{84}{2,68} = 7,84.\phi$$

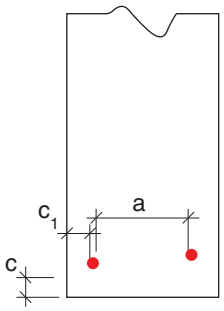
Longueur d'ancrage de calcul :

$$l_{bd} = \text{Max} \begin{cases} \alpha_1.\alpha_2.\alpha_3.\alpha_4.\alpha_5.l_{b,\ rqd} \\ 0,7.\alpha_1.\alpha_4.l_{b,\ rqd} \end{cases} \geq l_{b,\ min}$$

avec :

α_1, fonction de la forme des barres : barres droites tendues $\Rightarrow$ $\alpha_1 = 1$

$\alpha_2 = 1 - 0{,}15\dfrac{c_d - \phi}{\phi} \in [0{,}7\,;1]$, fonction des conditions d'enrobage



où :

$$c_d = \text{Min}\begin{cases}\dfrac{a}{2}\\ c_1\\ c\end{cases} \qquad c_d = 3{,}8\text{ cm} = \text{Min}\begin{cases}\dfrac{22 - 2(3 + 0{,}8 + 3{,}2)}{2} = 4{,}0\text{ cm}\\ 3 + 0{,}8 = 3{,}8\text{ cm}\\ 3 + 0{,}8 = 3{,}8\text{ cm}\end{cases}$$

$$\alpha_2 = 1 - 0{,}15\frac{3{,}8 - 3{,}2}{3{,}2} = 0{,}97 \in [0{,}7\,;1]$$

$\alpha_3 = 1 - K.\lambda \in [0{,}7\,;1]$, fonction des armatures transversales

où :

K, fonction de la position relative des armatures longitudinales et transversales :

A_s dans l'angle d'un cadre transversal

$\Rightarrow$ K = 0,1

$$\lambda = \frac{\sum A_{st} - \sum A_{st,\,min}}{A_s}$$

$\sum A_{st}$ = aire des armatures transversales sur l_{bd} :

$\sum A_{st}$ inconnu à ce stade de l'étude (il s'agit des armatures transversales à disposer sur la longueur d'ancrage l_{bd}).

A_s = aire de la section d'une barre ancrée : $A_s = 8{,}04\text{ cm}^2$ (1 ϕ 32 HA)

$$\sum A_{st,\ min} = \begin{cases} 0,25.A_s : \text{poutres,} \\ 0 : \text{dalles,} \end{cases} \qquad \sum A_{st,\ min} = 0,25.8,04 = 2,01\ cm^2$$

$\alpha_3 = 1$ par sécurité

α_4, fonction du confinement par des armatures sans soudure :

armatures transversales soudées
$\Rightarrow \quad \alpha_4 = 1$

$\alpha_5 = 1 - 0,04.p \quad \in [0,7\,;1]$,

fonction des conditions de pression transversales : $p = 0 \quad \Rightarrow \quad \alpha_5 = 1$

$$l_{bd} = 24,32\ cm = Max\begin{cases} 1.0,97.1.1.1,7.84.\phi = 7,60.\phi = 7,60.3,2 = 24,32\ cm \\ 0,7.1.1,7.84.\phi = 5,49.\phi = 5,49.3,2 = 17,56\ cm \end{cases}$$

$$l_{b,\ min} = Max\begin{cases} 0,3.l_{b,\ rqd} \\ 10.\phi \qquad : \text{barres tendues} \\ 100\ mm \end{cases}$$

$$l_{b,\ min} = 32\ cm = Max\begin{cases} 0,3.7,84.3,2 = 7,53\ cm \\ 10.3,2 = 32\ cm \\ 10\ cm \end{cases}$$

$l_{bd} = 24,32\ cm < l_{b,\ min} = 32\ cm \quad \Rightarrow \quad \boxed{l_{bd} = 35\ cm}$

5.2 Vérification du béton de la bielle d'about

Inclinaison de la bielle d'about :

$$\sin\theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{l_{bd}}{z}\right)^2}} \qquad \sin\theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{35}{0,9.80}\right)^2}} = 0,899 \quad \Rightarrow \quad \theta = 64,08°$$

Contrainte de la bielle d'about :

$$\sigma_{Rd,\ 1} = \frac{V_{Ed}}{l_{bd}.b_w.\sin^2\theta} \qquad \sigma_{Rd,\ 1} = \frac{0,269}{0,35.0,22.0,899^2} = 4,32\ MPa$$

Vérification :

$\sigma_{Rd,\ max} = k_2.\nu'.f_{cd}$

$k_2 = 0,85$

$$\nu' = 1 - \frac{f_{ck}}{250} \qquad \nu' = 1 - \frac{25}{250} = 0,9$$

$$\sigma_{Rd,\ max} = 0,85.0,9.16,7 = 12,78\ MPa$$

$\sigma_{Rd,\ 1} >< \sigma_{Rd,\ max}$ $\quad$ $\sigma_{Rd,\ 1} = 4,32\ MPa < 12,78\ MPa = \sigma_{Rd,\ max}$ O.K.

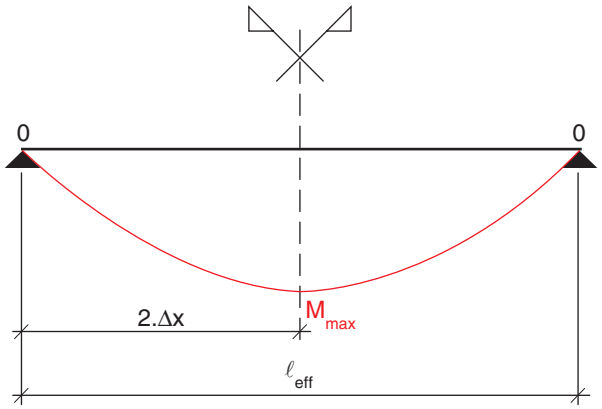
6. Liaison hourdis-nervure

6.1 Vérification de la compression des bielles

6.1.1 Introduction

Distance entre le point de moment maximal et le point de moment nul :

En l'absence d'indications sur la nature de la liaison entre le hourdis et l'appui, nous conduirons les calculs sur la base des portées efficaces.



Longueur de poutre à considérer :

$$\Delta x \le \frac{1}{2}.\frac{l_{eff}}{2} \qquad \Delta x \le \frac{10,00}{4} = 2,50\ m$$

6.1.2 Variation de l'effort de compression dans la dalle sur la longueur Δx

Compte tenu de la variation parabolique du moment fléchissant, on s'intéressera à la zone de poutre comprise entre l'appui et la section d'abscisse Δx pour laquelle cette variation est la plus grande.

Moment maximal (section à $\frac{l_{eff}}{2}$) :

$$M_{Ed} = \frac{p_u.l_{eff}^2}{8} \qquad M_{Ed} = \frac{58,57.10,00^2}{8} = 732,13\ mkN$$

Effort de compression dans la section d'abscisse Δx (à $\frac{l_{eff}}{4}$) :

$$M_{Ed} = \frac{p_u.\Delta x\left(l_{eff} - \Delta x\right)}{2} \qquad M_{Ed} = \frac{58,57.2,50(10,00 - 2,50)}{2} = 549,09 \text{ mkN}$$

$$M_{Tu} = b_{eff}.h_f.f_{cd}\left(d - \frac{h_f}{2}\right)$$

$$M_{Tu} = 2,22.0,15.16,7\left(0,80 - \frac{0,15}{2}\right) = 4,031 \text{ mMN}$$

$M_{Ed} >< M_{Tu}$ $\qquad M_{Ed} = 0,549 \text{ mMN} < 4,031 \text{ mMN} = M_{Tu}$

$\Rightarrow$ section rectangulaire de largeur b_{eff}.

$$\mu_{cu} = \frac{M_{Ed}}{b_{eff}.d^2.f_{cd}} \qquad \mu_{cu} = \frac{0,549}{2,22.0,80^2.16,7} = 0,023$$

$$\alpha_u = \frac{1}{\lambda}\left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{cu}}\right] \qquad \alpha_u = \frac{1}{0,8}\left[1 - \sqrt{1 - 2.0,023}\right] = 0,029$$

$$x_u = \alpha_u.d \qquad x_u = 0,029.0,80 = 0,023 \text{ m}$$

$$F_{cd} = \lambda.b_{eff}.x_u.f_{cd} \qquad F_{cd} = 0,8.2,22.0,023.16,7 = 0,682 \text{ MN}$$

6.1.3 Effort de glissement moyen sur la longueur Δx

b_{eff} $\qquad b_{eff} = 2,22 \text{ m}$

$\Delta F = F_{cd} - 0 \qquad \Delta F = 0,682 \text{ MN}$

$$\Delta F_d = \Delta F\frac{b_{eff} - b_w}{2.b_{eff}} \qquad \Delta F_d = 0,682\frac{2,22 - 0,22}{2.2,22} = 0,307 \text{ MN}$$

$$\Delta x = \frac{1}{2}.\frac{l_{eff}}{2} \qquad \Delta x = \frac{10,00}{4} = 2,50 \text{ m}$$

$$v_{Ed} = \frac{\Delta F_d}{h_f.\Delta x} \qquad v_{Ed} = \frac{0,307}{0,15.2,50} = 0,82 \text{ MPa}$$

6.1.4 Vérification de la compression des bielles de béton

$$v_{Ed} \le \nu.f_{cd}.\underbrace{\sin\theta_f.\cos\theta_f}_{\frac{1}{2}\sin 2\theta_f}$$

$$\Rightarrow \quad \sin 2\theta_f \ge \frac{2.v_{Ed}}{\nu.f_{cd}} \qquad \sin 2\theta_f \ge \frac{2.0,82}{0,54.16,7} = 0,182$$

$$\Rightarrow \quad 2.\theta_f \ge 10,48° \quad \Rightarrow \quad \theta_f \ge 5,24° \quad \Rightarrow \quad \text{cotg}\theta_f \le 10,90$$

$1 \le \text{cotg}\theta_f \le 2$ dans la membrure comprimée $\qquad \text{cotg}\theta_f \le 2$ vérifié.

6.2 Armatures de liaison de l'âme à la membrure

Pour la valeur maximale de θ_f, nous avons $\text{cotg}\theta_f$ minimal et, par conséquent, $\frac{A_{sf}}{s_f}$ maximal.

Prenons : $\qquad \text{cotg}\theta_f = 2 \quad \Rightarrow \quad \theta_f = 26,57°$

$$\frac{A_{sf}}{s_f} \ge \frac{v_{Ed}.h_f}{f_{yd}.\text{cotg}\theta_f} \qquad \frac{A_{sf}}{s_f} \ge \frac{0,82.0,15}{435.2}10^2 = \frac{1}{70,73}\ \text{cm}^2/\text{cm}$$

Pour $s_f = 100$ cm, les aciers supérieurs et inférieurs de la dalle, doivent vérifier :

$$\boxed{A_{sf} = \left(A_{s,\,sup} + A_{s,\,inf}\right) \ge \frac{100}{70,73} = 1,41\ \text{cm}^2/\text{m}}$$

Remarque 1

Si la condition n'est pas vérifiée par les armatures existantes de la dalle, on peut, au lieu de rajouter des armatures, réduire proportionnellement la largeur b_{eff} et reprendre le calcul des aciers longitudinaux (dont la section augmente, mais faiblement).

Remarque 2

$v_{Ed} >< k.f_{ctd}$ avec $k = 0,4$: $\quad v_{Ed} = 0,82\ \text{MPa} > 0,476\ \text{MPa} = 0,4.1,19 = 0,4.f_{ctd}$

$\Rightarrow$ Les armatures de la dalle doivent être complétées :

$$\frac{A_{sf}}{s_f} \ge \text{Max}\begin{cases} \dfrac{v_{Ed}.h_f}{f_{yd}.\text{cotg}\theta_f} \\ \dfrac{1}{2}.\dfrac{v_{Ed}.h_f}{f_{yd}.\text{cotg}\theta_f} + \dfrac{A_{s,\,sup} + A_{s,\,inf}}{s_f} \end{cases}$$

$$\frac{A_{sf}}{s_f} \ge \text{Max}\begin{cases} 1,41\ \text{cm}^2/\text{m} \\ 0,71\ \text{cm}^2/\text{m} + \dfrac{A_{s,\,sup} + A_{s,\,inf}}{s_f} \end{cases}$$

Remarque 3

Pour l'Annexe nationale française :

$v_{Ed} >< k.f_{ctd}$

avec :

$k = \begin{cases} 0{,}50 : \text{surface verticale de reprise de bétonnage rugueuse,} \\ 1{,}00 : \text{absence de surface verticale de reprise de bétonnage.} \end{cases}$

$v_{Ed} >< k.f_{ctd}$

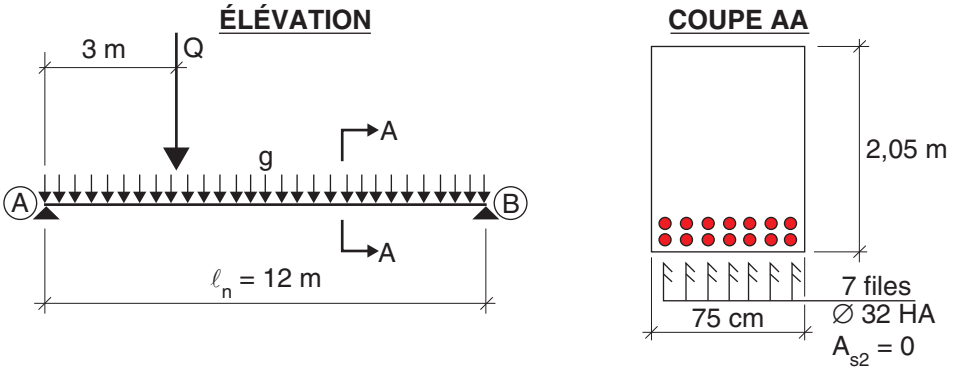
$v_{Ed} = 0{,}82\ \text{MPa} < 1{,}19\ \text{MPa} = 1.1{,}19 = 1.f_{ctd}$

⇒ Il n'est pas nécessaire de compléter les armatures de flexion de la dalle.

Application n° 2 : armatures d'effort tranchant – Méthode de l'inclinaison variable des bielles

–Énoncé–

On considère la poutre figurée ci-dessous :



Action variable : Q = 3,525 kN.

Plus de la moitié des aciers longitudinaux sont arrêtés en travée.

Matériaux :

- béton : f_{ck} = 25 MPa ;
- aciers : S 500.

Enrobage des armatures : c_{nom} = 3 cm.

On se propose :
1/ de calculer les efforts tranchants non réduits et réduits pour transmission directe des charges aux appuis ;
2/ de calculer les armatures transversales par la méthode de l'inclinaison variable des bielles ;
3/ de déterminer les aciers longitudinaux inférieurs sur appui simple d'about lorsque les armatures d'âme sont droites en admettant que $l_{bd} = 15.\phi$.

–Corrigé–

1. Effort tranchant

1.1 Effort tranchant non réduit

Charges :

ϖ = poids volumique du béton armé $\quad \varpi = 25$ kN/m^3

$g = \varpi.b_w.h$ $\quad g = 25.10^{-3}.0,75.2,05 = 0,0384$ MN/m

$p_u = 1,35.g$ $\quad p_u = 1,35.0,0384 = 0,0518$ MN/m

$P_u = 1,5.Q$ $\quad P_u = 1,5.3,525 = 5,288$ MN

Effort tranchant au nu d'appui : la poutre étant isostatique sur deux appuis simples, l'effort tranchant au nu d'appui peut être calculé à partir de la portée entre nus d'appuis (pas de terme en $\Delta M/l$).

$$V_{Ed} = \frac{p_u.l_n}{2} + P_u\left(1 - \frac{a}{l_n}\right)$$

$$V_{Ed} = \underbrace{\frac{0,0518.12,00}{2}}_{0,311\text{ MN}} + \underbrace{5,288\left(1 - \frac{3,00}{12,00}\right)}_{3,966\text{ MN}} = 4,277\text{ MN}$$

1.2 Effort tranchant réduit (transmission directe des charges aux appuis)

Charges uniformément réparties :

$d = 0,9.h$ $\quad d = 0,9.2,05 = 1,845 \approx 1,85$ m

$V_{Ed}(p_u) >< V_{Ed}(P_u)$ $\quad V_{Ed}(p_u) = 0,311$ MN $<<$ 3,966 MN $= V_{Ed}(P_u)$

$\Rightarrow$ charges réparties non prépondérantes.

$\Rightarrow$ pas de réduction de V_{Ed} pour transmission directe de ces charges aux appuis.

Charge concentrée d'abscisse $x = a_v = 3{,}00$ m :

$0{,}5.d >< a_v >< 2.d$ $\qquad$ $0{,}5.1{,}85 = 0{,}925 \text{ m} < a_v = 3{,}00 \text{ m} < 3{,}70 \text{ m} = 2.1{,}85$

$$\beta = \text{Max}\begin{cases}\dfrac{a_v}{2.d}\\[2mm] \dfrac{1}{4}\end{cases} \qquad \beta = 0{,}811 = \text{Max}\begin{cases}\dfrac{3{,}00}{2.1{,}85} = 0{,}811\\[2mm] \dfrac{1}{4} = 0{,}25\end{cases}$$

$$V_{Ed0}(P_u) = \beta.V_{Ed}(P_u) \qquad V_{Ed0}(P_u) = 0{,}811.3{,}966 = 3{,}216 \text{ MN}$$

Total au nu d'appui :

$$V'_{Ed0} = V_{Ed}(p_u) + V_{Ed0}(P_u) \qquad V'_{Ed0} = 0{,}311 + 3{,}216 = 3{,}527 \text{ MN}$$

Cette valeur n'est utilisée que pour :

- la condition relative à la nécessité d'armatures d'effort tranchant $\left(V_{Ed} >< V_{Rd,\,c1}\right)$;
- la vérification complémentaire pour les charges concentrées au voisinage des appuis (voir § 3.5) ;
- et le calcul des armatures d'âme.

Pour la vérification de la compression des bielles de béton, il faut prendre :

$$V_{Ed} = V_{Ed}(p_u) + V_{Ed}(P_u) \qquad V_{Ed0} = 0{,}311 + 3{,}966 = 4{,}277 \text{ MN}$$

2. Nécessité de mettre des armatures d'effort tranchant

2.1 Effort tranchant résistant de calcul de l'élément sans armatures d'âme : $V_{Rd,\,c}$

$$f_{ck} \le 50 \text{ MPa} \Rightarrow f_{ctm} = 0{,}3\left[f_{ck}\right]^{2/3} \qquad f_{ctm} = 0{,}3\left[25\right]^{2/3} = 2{,}56 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk,\,0{,}05} = 0{,}7.f_{ctm} \qquad f_{ctk,\,0{,}05} = 0{,}7.2{,}56 = 1{,}79 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = \alpha_{cc}\frac{f_{ck}}{\gamma_c} \qquad f_{cd} = 1\frac{25}{1{,}5} = 16{,}7 \text{ MPa}$$

$$C_{Rd,\,c} = \frac{0{,}18}{\gamma_c} \qquad C_{Rd,\,c} = \frac{0{,}18}{1{,}5} = 0{,}12$$

$$k = \text{Min}\begin{cases}1 + \sqrt{\dfrac{200 \text{ mm}}{d}}\\[2mm] 2\end{cases} \qquad k = 1{,}33 = \text{Min}\begin{cases}1 + \sqrt{\dfrac{200}{1\,850}} = 1{,}33\\[2mm] 2\end{cases}$$

$k_1 = 0,15$ $\qquad$ $k_1 = 0,15$

$v_{min} = 0,035.k^{3/2}.\sqrt{f_{ck}}$ $\qquad$ $v_{min} = 0,035.1,33^{3/2}.\sqrt{25} = 0,268$

A_{sl} = aire de l'armature longitudinale dans la section distante de $d + l_{bd}$ de celle étudiée : $\qquad$ $A_{sl} = 13.8,04 = 104,52\ cm^2$ (2 lits inférieurs de 7 et 6 ϕ 32 : voir § 4.1).

$\rho_l = \dfrac{A_{sl}}{b_w.d} \not> 2\ \%$ $\qquad$ $\rho_l = \dfrac{104,52}{75.185} = 0,008 < 2\ \%$

N_{Ed} = effort normal $\qquad$ $N_{Ed} = 0$ (flexion simple)

$\sigma_{cp} = \dfrac{N_{Ed}}{A_c}$ $\qquad$ $\sigma_{cp} = 0$

$$V_{Rd,\,c} = \text{Max}\begin{cases}\left[C_{Rd,\,c}.k.\sqrt[3]{100.\rho_l.f_{ck}} + k_1.\sigma_{cp}\right] b_w.d = V_{Rd,\,c1}\\ \left[v_{min} + k_1.\sigma_{cp}\right] b_w.d = V_{Rd,\,c2}\end{cases}$$

$$V_{Rd,\,c1} = \left[0,12.1,33\sqrt[3]{100\,\frac{8}{1\,000}\,25} + 0,15.0\right] 0,75.1,85 = 0,601\ MN$$

$$V_{Rd,\,c2} = \left[0,268 + 0,15.0\right] 0,75.1,85 = 0,372\ MN$$

Remarque pour l'Annexe nationale française

$$v_{min} = \begin{cases}\dfrac{0,34}{\gamma_c}\sqrt{f_{ck}} : \text{dalles bénéficiant d'un effet de redistribution transversale sous le cas de charge considéré,}\\ \dfrac{0,053}{\gamma_c}k^{3/2}\sqrt{f_{ck}} : \text{poutres et autres dalles,}\\ \dfrac{0,35}{\gamma_c}\sqrt{f_{ck}} : \text{voiles.}\end{cases}$$

Poutre $\Rightarrow$ $v_{min} = \dfrac{0,053}{\gamma_c}k^{3/2}.\sqrt{f_{ck}} = \dfrac{0,053}{1,5}1,33^{3/2}.\sqrt{25} = 0,268$

Soit la même valeur que celle recommandée par l'EC 2.

2.2 Vérification

Effort tranchant résistant de calcul en l'absence d'armatures d'âme :

$V'_{Ed0} >< V_{Rd,\,c1}$ $\qquad$ $V'_{Ed0} = 3,527\ MN > 0,601\ MN = V_{Rd,\,c1}$

$V_{Ed} >< V_{Rd,\,c2}$ $\qquad$ $V_{Ed} = 4,277\ MN > 0,372\ MN = V_{Rd,\,c2}$

$\Rightarrow$ armatures d'effort tranchant calculées nécessaires

Vérification supplémentaire pour les charges concentrées au voisinage des appuis :

$$\nu = 0,6\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \qquad \nu = 0,6\left(1 - \frac{25}{250}\right) = 0,54$$

$V_{Ed} >< 0,5.b_w.d.\nu.f_{cd}$

$$V_{Ed} = 4,277 \text{ MN} < 6,256 \text{ MN} = 0,5.0,75.1,85.0,54.16,7$$

$V'_{Ed0} >< A_{sw}.f_{ywd}.\sin\alpha$ voir § 3.5 (A_{sw} non déterminée à ce stade de l'étude)

3. Armatures d'effort tranchant calculées par la méthode des bielles d'inclinaison variable

3.1 Choix de l'inclinaison des bielles

$\nu_1 = 0,6\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$ (A_{sw} calculées pour f_{ywk}) $\nu_1 = 0,6\left(1 - \frac{25}{250}\right) = 0,54$

$$\nu_0 = \frac{V_{Ed}}{b_w.z.\nu_1.f_{cd}} \qquad \nu_0 = \frac{4,277}{0,75.0,9.1,85.0,54.16,7} = 0,379$$

$z = 0,9.d$

En choisissant des armatures d'effort tranchant droites : $\alpha = 90^\circ$

$$\cot g\theta = \frac{1 + \sqrt{1 - 4.\nu_0\left(\nu_0 - \cot g\alpha\right)}}{2.\nu_0}$$

$$\cot g\theta = \frac{1 + \sqrt{1 - 4.0,379\left(0,379 - 0\right)}}{2.0,379} = 2,180$$

$1 \leq \cot g\theta \leq 2,5$ (valeur recommandée et à utiliser en flexion simple pour l'Annexe nationale française) : $\cot g\theta = 2,18 < 2,5 \Rightarrow$ Retenu $\boxed{\cot g\theta = 2}$.

3.2 Vérification de la compression des bielles de béton

Effort tranchant de calcul maximal pouvant être supporté sans provoquer l'écrasement des bielles de béton comprimé :

$$\begin{cases} V_{Rd,\,max} = b_w.z.\nu_1.f_{cd}\,\dfrac{\cot g\theta + \cot g\alpha}{1 + \cot g^2\theta} \\ z = 0,9.d \end{cases}$$

$\alpha = 90^\circ$ en adoptant des armatures d'âme droites.

$$V_{Rd,\ max} = 0,75.0,9.1,85.0,54.16,7\frac{2+0}{1+2^2} = 4,504\ MN$$

$V_{Ed} << V_{Rd,\ max}$ $\qquad$ $\boxed{V_{Ed} = 4,277\ MN < 4,504\ MN = V_{Rd,\ max}\ O.K.}$

Remarque

Pour $\cot g\theta = 2,18$, on a :

$$\begin{cases} V_{Rd,\ max} = b_w.z.\nu_1.f_{cd}\dfrac{\cot g\theta + \cot g\alpha}{1+\cot g^2\theta} \\ z = 0,9.d \end{cases}$$

$$V_{Rd,\ max} = 0,75.0,9.1,85.0,54.16,7\frac{2,18+0}{1+2,18^2} = 4,268\ MN$$

$V_{Ed} << V_{Rd,\ max}$ $\qquad$ $V_{Ed} = 4,277\ MN > 4,268\ MN = V_{Rd,\ max}$

et la vérification de la compression des bielles n'est pas assurée.

Nous pouvons remarquer que :

$$\theta \downarrow \ \Rightarrow\ \cot g\theta \uparrow \ \Rightarrow\ V_{rd,\ max} \downarrow \text{ et } \left(\frac{A_{sw}}{s}\right)_{Calculé} \downarrow$$

3.3 Armatures d'effort tranchant

Calculées :

$$f_{ywd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \qquad f_{ywd} = \frac{500}{1,15} = 435\ MPa$$

α = inclinaison des A_{sw} $\qquad$ A_{sw} droites $\Rightarrow$ $\alpha = 90^\circ$

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{V'_{Ed0}}{0,9.d.f_{ywd}\left(\cot g\theta + \cot g\alpha\right)\sin\alpha}$$

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{3,527}{0,9.1,85.435.(2+0)1}10^2 = \frac{1}{4,11}\ cm^2/cm$$

V'_{Ed0} = effort tranchant réduit pour les seules charges concentrées (charges réparties non prépondérantes).

Maximales :

$$\frac{A_{sw}.f_{ywd}}{b_w.s} \leq \frac{\frac{1}{2}\nu_1.f_{cd}.\sin\alpha}{1-\cos\alpha} \qquad \frac{A_{sw}}{s} \leq \frac{\frac{1}{2}0,54.16,7.1}{435(1-0)}75 = \frac{1}{1,28}\ cm^2/cm$$

$$\boxed{\frac{A_{sw}}{s} = \frac{1}{4,11} < \frac{1}{1,28}\ cm^2/cm\ O.K.}$$

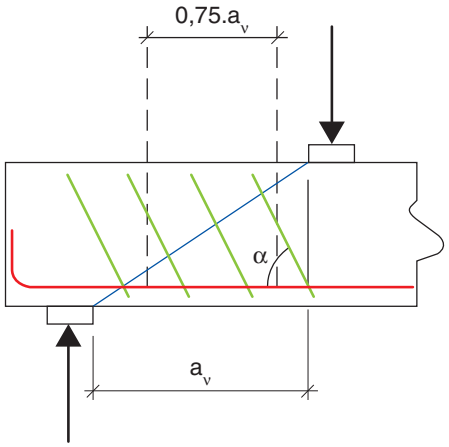
3.4 Pourcentage minimal

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s.b_w.\sin\alpha} \geq 0,08\frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}$$

$$\alpha = 90° \quad \Rightarrow \quad \frac{A_{sw}}{s} \geq 0,08\frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} b_w = 0,08\frac{\sqrt{25}}{500}75 = \frac{1}{16,67}\ cm^2/cm$$

$$\boxed{\frac{A_{sw}}{s} = \frac{1}{4,11}\ cm^2/cm > \frac{1}{16,67}\ cm^2/cm \text{ O.K.}}$$

3.5 Vérification complémentaire pour charges concentrées au voisinage des appuis



Comme : $0,5.d \leq a_v \leq 2.d$:

$0,75.a_v = 0,75.3,00 = 2,25$ m

$$A_{sw} = \frac{1}{\theta_0}0,75.a_v = \frac{2,25}{4,11}10^2 = 54,74\ cm^2$$

$V'_{Ed0} >< A_{sw}.f_{ywd}.\sin\alpha$

$V'_{Ed0} = 3,527\ MN > 2,38\ MN = 54,74.10^{-4}.435.1 = A_{sw}.f_{ywd}.\sin\alpha$

$\Rightarrow$ Il faut augmenter A_{sw}.

Section nécessaire :

$V'_{Ed0} >< A_{sw}.f_{ywd}.\sin\theta$ $\qquad \frac{A_{sw}}{s} = \frac{3,527}{435.1.2,25}10^2 = \frac{1}{2,78}\ cm^2/cm$

Vérification de la section maximale (voir § 3.3) :

$$\boxed{\frac{A_{sw}}{s} = \frac{1}{2,78} < \frac{1}{1,28}\ cm^2/cm \text{ O.K.}}$$

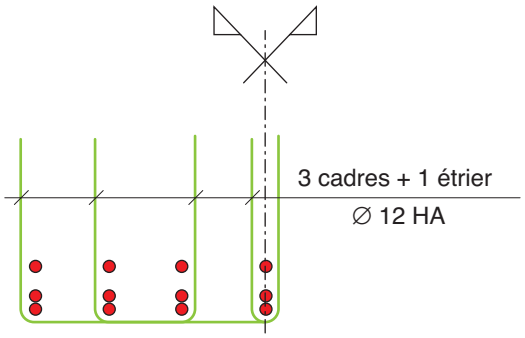
Vérification du pourcentage minimal (voir § 3.4) :

$$\boxed{\frac{A_{sw}}{s} = \frac{1}{2,78}\ cm^2/cm > \frac{1}{16,67}\ cm^2/cm \text{ O.K.}}$$

3.6 Espacement

Prenons $\boxed{\phi_w = 12 \text{ mm}}$

d'où $\left(\phi_w > \frac{\phi_l}{3} = \frac{32}{3} = 10,7 \text{ mm}\right)$ pour « coudre » sept files verticales :



$A_{sw} = 8.1,13 = 9,04 \text{ cm}^2$

$\Rightarrow \quad s_0 = 9,04.2,78 = 25,1 \text{ cm}$

Retenons : 3 cadres + 1 étrier ϕ 12 HA :
$s_0 = 25$ cm

3.6.1 Espacement longitudinal maximal

$$s_{l,\,max} = \text{Min}\begin{cases} 0,75.d\left(1 + \text{cotg}\alpha\right) \\ 15.\phi \text{ si } A_{s2} \neq 0 \end{cases}$$

$$s_{l,\,max} = 1,38 \text{ m} = 0,75.1,85\left(1 + 0\right)$$

$s_0 >< s_{l,\,max}$

$s_0 = 25 \text{ cm} < s_{l,\,max} = 138 \text{ cm}$ O.K.

3.6.2 Espacement transversal maximal

$$s_{t,\,max} = \text{Min}\begin{cases} 0,75.d \\ 600 \text{ mm} \end{cases}$$

$$s_{t,\,max} = 0,60 \text{ m} = \text{Min}\begin{cases} 0,75.1,85 = 1,385 \text{ m} \\ 0,60 \text{ m} \end{cases}$$

$$s_t = \frac{b_w - 2\left(c_{nom} + \phi_t + \frac{\phi}{2}\right)}{n}$$

$$s_t = \frac{75 - 2\left(3 + 1,2 + \frac{3,2}{2}\right)}{6} = 10,57 \text{ cm}$$

$s_t >< s_{t,\,max}$

$\boxed{s_t = 10,57 \text{ cm} < s_{t,\,max} = 60 \text{ cm O.K.}}$

3.7 Retenu

3 cadres + 1 étrier ϕ 12 HA : s = 25 cm

3.8 Remarque – Cas des armatures d'âme inclinées

3.8.1 Inclinaison des armatures d'âme

$$\nu_0 = \frac{V_{Ed}}{b_w.z.\nu_1.f_{cd}} \qquad \nu_0 = \frac{4,277}{0,75.0,9.1,85.0,54.16,7} = 0,379 \text{ (voir § 3.1.)}$$

$z = 0,9.d$

En choisissant des armatures d'effort tranchant inclinées à 45° : $\alpha = 45°$

$$\cot g\theta = \frac{1 + \sqrt{1 - 4.\nu_0(\nu_0 - \cot g\alpha)}}{2.\nu_0}$$

$$\cot g\theta = \frac{1 + \sqrt{1 - 4.0,379(0,379 - 1)}}{2.0,379} = 2,180$$

$1 \le \cot g\theta \le 2,5$ (valeur recommandée et à utiliser en flexion simple pour l'Annexe nationale française) : $\cot g\theta = 2,18 < 2,5 \Rightarrow$ Retenu $\boxed{\cot g\theta = 2}$.

3.8.2 Compression des bielles

$$\begin{cases} V_{Rd,\,max} = b_w.z.\nu_1.f_{cd}\dfrac{\cot g\theta + \cot g\alpha}{1 + \cot g^2\theta} \\ z = 0,9.d \end{cases}$$

$$V_{Rd,\,max} = 0,75.0,9.1,85.0,54.16,7\,\frac{2 + 1}{1 + 2^2} = 6,76 \text{ MN}$$

Le fait d'incliner les armatures d'effort tranchant augmente $V_{Rd,\,max}$ et permet d'assurer : $V_{Ed} \le V_{Rd,\,max}$ lorsque l'on ne peut y arriver avec des armatures d'âme droites.

$V_{Ed} >< V_{Rd,\,max}$ $\qquad \boxed{V_{Ed} = 4,277 \text{ MN} < 6,76 \text{ MN} = V_{Rd,\,max} \quad \text{O.K.}}$

3.8.3 Armatures d'effort tranchant

$$\frac{A_{sw}}{s} \ge \frac{V'_{Ed0}}{0,9.d.f_{ywd}(\cot g\theta + \cot g\alpha)\sin\alpha}$$

$$\frac{A_{sw}}{s} \ge \frac{3,527}{0,9.1,85.435(2 + 1)\frac{\sqrt{2}}{2}}\,10^2 = \frac{1}{4,26} \text{ cm}^2/\text{cm}$$

V'_{Ed0} = effort tranchant réduit pour transmission des charges aux appuis.

Cette quantité est légèrement inférieure à celle trouvée pour des armatures d'effort tranchant droites ($\frac{1}{4,11}$) lorsque l'on ne tient pas compte de la condition : $V'_{Ed0} \le A_{sw}.f_{ywd}.\sin\alpha$.

Comme $0,5.d \le a_v \le 2.d$, il faut de plus que :

$$\frac{A_{sw}}{s} \ge \frac{V'_{Ed0}}{0,75.a_v.f_{ywd}.\sin\alpha} \qquad \frac{A_{sw}}{s} \ge \frac{1}{4,26} < \frac{1}{1,96}\ cm^2/cm = \frac{3,527}{0,75.3,00.435\ \frac{\sqrt{2}}{2}}$$

d'où :

$\Rightarrow$ 3 cadres + 1 étrier ϕ 12 HA inclinés à 45° :

$A_{sw} = 8.1,13 = 9,04\ cm^2$

$s_0 = 9,04.1,96 = 17,7\ cm \Rightarrow s_0 = 17\ cm.$

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s.b_w.\sin\alpha} \qquad \rho_w = \frac{9,04}{17.75.\frac{\sqrt{2}}{2}} = 1,0\ \%$$

$\Rightarrow$ 3 cadres + 1 étrier ϕ 12 HA inclinés à 45° :

$s = 17\ cm$

Remarque

La section d'armatures d'âme est obtenue par la condition complémentaire pour les charges concentrées au voisinage des appuis :

$$\frac{A_{sw}}{s} \ge \frac{V'_{Ed0}}{0,75.a_v.f_{ywd}.\sin\alpha}$$

laquelle donne davantage d'armatures lorsque l'inclinaison α diminue.

4. Armatures inférieures tendues sur appui simple d'about

4.1 Armatures inférieures tendues sur appui d'about

Dans l'hypothèse des armatures d'âme droites ($\alpha = 90°$).

$z = 0,9.d$

$$a_1 = \frac{z(\cot g\theta - \cot g\alpha)}{2} \qquad a_1 = \frac{0,9.1,85(2-0)}{2} = 1,67\ m$$

V_{Ed} $\qquad V_{Ed} = 4,277\ MN$ (au nu d'appui)

A_1 = section d'aciers longitudinaux en travée $\quad A_1 = 7.2.8,04 = 112,56\ cm^2$

$$A_s \ge Max \begin{cases} \beta_2.A_1 \text{ avec } \beta_2 = 0,25 \\ \dfrac{F_E}{f_{yd}} = \dfrac{V_{Ed}\dfrac{a_1}{z} + N_{Ed}}{f_{yd}} \end{cases}$$

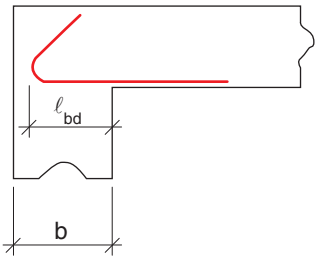
$$A_s \geq 98,62\ cm^2 = Max \begin{cases} \dfrac{112,56}{4} = 28,14\ cm^2 \\ 4,277\dfrac{1,67}{0,9.1,85} + 0 \\ \dfrac{}{435} 10^4 = 98,62\ cm^2 \end{cases}$$

Comme on avait sept files de ϕ 32 HA en travée, on garde :

13 ϕ 32 HA sur appui (lit inférieur et 6 barres du second lit) :

$A_s = 13.8,04 = 104,52\ cm^2$

ancrés au-delà du nu d'appui sur :



Remarque pour l'Annexe nationale française :

$$A_s \geq \frac{F_E}{f_{yd}} = \frac{V_{Ed}\dfrac{a_l}{z} + N_{Ed} + \dfrac{M_{Ed}}{z}}{f_{yd}}$$

$$A_s \geq \frac{4,277\dfrac{1,67}{0,9.1,85} + 0 + \dfrac{0}{0,9.1,85}}{435} 10^4 = 98,62\ cm^2$$

Valeur identique à celle recommandée par l'EC 2.

On conserve 13 ϕ 32 HA sur appui (dispositions constructives).

4.2 Vérification du béton de la bielle d'about

Inclinaison de la bielle d'about :

$l_{bd} = 15.\phi$ $\qquad$ $l_{bd} = 15.3,2 = 96\ cm$

$$\sin\theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{l_{bd}}{z}\right)^2}} \qquad \sin\theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{96}{0,9.185}\right)^2}} = 0,866 \Rightarrow \theta = 60,03°$$

Contrainte de la bielle d'about :

$$\sigma_{Rd,\,1} = \frac{V_{Ed}}{l_{bd}.b_w.\sin^2\theta} \qquad \sigma_{Rd,\,1} = \frac{4,277}{0,96.0,75.0,866^2} = 7,92 \text{ MPa}$$

Vérification :

$$\sigma_{Rd,\,max} = k_2.\nu'.f_{cd}$$

$$k_2 = 0,85$$

$$\nu' = 1 - \frac{f_{ck}}{250} \qquad \nu' = 1 - \frac{25}{250} = 0,9$$

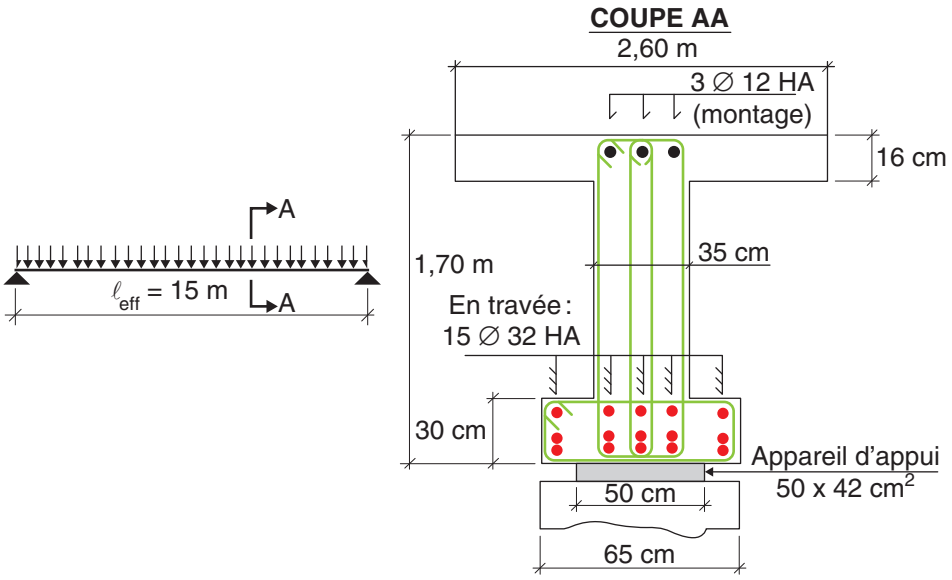
$$\sigma_{Rd,\,max} = 0,85.0,9.16,7 = 12,78 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Rd,\,1} >< \sigma_{Rd,\,max}$$

$$\boxed{\sigma_{Rd,\,1} = 7,92 \text{ MPa} < 12,78 \text{ MPa} = \sigma_{Rd,\,max} \quad \text{O.K.}}$$

Application n° 3 : poutre à talon

–Énoncé–



On considère la poutre figurée ci-dessus extraite d'un pont constitué de poutres espacées de 2,60 m. Les armatures longitudinales (3 lits de 5 ϕ 32 HA) ont été déterminées par l'application n° 6 du chapitre 7 : « Flexion simple ».

Actions uniformément réparties : $p_u = 271{,}71$ KN/m.

Hauteur utile : d = 1,58 m, enrobage : $c_{nom} = 3$ cm.

On se propose :
1/ de calculer les armatures d'âme par la méthode des bielles d'inclinaison variable ;
2/ de vérifier les abouts de la poutre pour une inclinaison des bielles : $\theta = 45^\circ$;
3/ de vérifier la jonction talon-nervure.

–Corrigé–

1. Effort tranchant

1.1 Effort tranchant maximal

Au nu de l'appareil d'appui :

$l_n = l_{eff} - t$ $\qquad$ $l_n = 15{,}00 - 0{,}42 = 14{,}58$ m

$V_{Ed} = \dfrac{p_u . l_n}{2}$ $\qquad$ $V_{Ed} = \dfrac{271{,}71.14{,}58}{2} = 1\,980{,}77$ kN

1.2 Effort tranchant réduit (transmission directe des charges aux appuis)

Charges uniformément réparties :

À la distance d de l'appareil d'appui :

$V_{Ed0} = V_{Ed} - p_u . d$ $\qquad$ $V_{Ed0} = 1\,980{,}77 - 271{,}71.1{,}58 = 1\,551{,}47$ kN

2. Nécessité de mettre des armatures d'effort tranchant

2.1 Effort tranchant résistant de calcul de l'élément sans armatures d'âme : $V_{Rd,\,c}$

$f_{ck} \leq 50$ MPa $\Rightarrow$ $f_{ctm} = 0{,}3\left[f_{ck}\right]^{2/3}$ $\qquad$ $f_{ctm} = 0{,}3\left[25\right]^{2/3} = 2{,}56$ MPa

$f_{ctk,\,0{,}05} = 0{,}7 . f_{ctm}$ $\qquad$ $f_{ctk,\,0{,}05} = 0{,}7.2{,}56 = 1{,}79$ MPa

$f_{ctd} = \alpha_{ct} \dfrac{f_{ctk,\,0{,}05}}{\gamma_c}$ $\qquad$ $f_{ctd} = 1\dfrac{1{,}79}{1{,}5} = 1{,}19$ MPa

$f_{cd} = \alpha_{cc} \dfrac{f_{ck}}{\gamma_c}$ $\qquad$ $f_{cd} = 1\dfrac{25}{1{,}5} = 16{,}7$ MPa

A_{sl} = aire de l'armature longitudinale dans la section distante de $d + l_{bd}$ de celle étudiée : $A_{sl} = 5.8,04 = 40,20\ cm^2$ (lit inférieur de 5 ϕ 32 : voir § 4.1).

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w.d} \not> 2\ \% \qquad \rho_l = \frac{40,20}{35.158} = 0,007 < 2\ \%$$

N_{Ed} = effort normal $\qquad N_{Ed} = 0$ (flexion simple)

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} \qquad \sigma_{cp} = 0$$

Effort tranchant pouvant être supporté sans armatures d'âme :

$$V_{Rd,\,c} = Max \begin{cases} \left[C_{Rd,\,c}.k.\sqrt[3]{100.\rho_l.f_{ck}} + k_1.\sigma_{cp}\right] b_w.d = V_{Rd,\,c1} \\ \left[v_{min} + k_1.\sigma_{cp}\right] b_w.d = V_{Rd,\,c2} \end{cases}$$

avec :

$$C_{Rd,\,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} \qquad C_{Rd,\,c} = \frac{0,18}{1,5} = 0,12$$

$$k = Min \begin{cases} 1 + \sqrt{\frac{200\ mm}{d}} \\ 2 \end{cases} \qquad k = 1,36 = Min \begin{cases} 1 + \sqrt{\frac{200}{1\,580}} = 1,36 \\ 2 \end{cases}$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0,2.f_{cd} \qquad \sigma_{cp} = \frac{0}{A_c} = 0 \text{ (flexion simple)}$$

$k_1 = 0,15 \qquad k_1 = 0,15$

$$v_{min} = 0,035.k^{3/2}.\sqrt{f_{ck}} \qquad v_{min} = 0,035.1,36^{3/2}.\sqrt{25} = 0,278$$

$$V_{Rd,\,c1} = \left[0,12.1,36\sqrt[3]{100\frac{7}{1\,000}25} + 0,15.0\right] 0,35.1,58 = 0,234\ MN$$

$$V_{Rd,\,c2} = (0,278 + 0,15.0)\,0,35.1,58 = 0,154\ MN$$

Remarque pour l'Annexe nationale française

$$v_{min} = \begin{cases} \frac{0,34}{\gamma_c}\sqrt{f_{ck}} : \text{dalles bénéficiant d'un effet de redistribution transversale sous le cas de charge considéré,} \\ \frac{0,053}{\gamma_c}k^{3/2}\sqrt{f_{ck}} : \text{poutres et autres dalles,} \\ \frac{0,35}{\gamma_c}\sqrt{f_{ck}} : \text{voiles.} \end{cases}$$

Poutre $\Rightarrow \quad v_{min} = \frac{0,053}{\gamma_c} k^{3/2} . \sqrt{f_{ck}} = \frac{0,053}{1,5} 1,36^{3/2} . \sqrt{25} = 0,278$

Soit la même valeur que celle recommandée par l'EC 2. ($\frac{0,053}{\gamma_c} = \frac{0,053}{1,5} = 0,035$).

2.2 Vérification

$V_{Ed0} >< V_{Rd,\,c1}$ $\qquad V_{Ed0} = 1,551\ MN > 0,234\ MN = V_{Rd,\,c1}$

$V_{Ed0} >< V_{Rd,\,c2}$ $\qquad V_{Ed0} = 1,551\ MN > 0,154\ MN = V_{Rd,\,c2}$

$\Rightarrow$ armatures d'effort tranchant calculées nécessaires

3. Armatures d'effort tranchant

3.1 Choix de l'inclinaison des bielles de béton comprimé

$\nu_1 = 0,6\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$ (A_{sw} calculées pour f_{ywk}) $\nu_1 = 0,6\left(1 - \frac{25}{250}\right) = 0,54$

$\nu_0 = \frac{V_{Ed}}{b_w . z . \nu_1 . f_{cd}}$ $\qquad \nu_0 = \frac{1,981}{0,35.0,9.1,58.0,54.16,7} = 0,441$

$z = 0,9.d$

En choisissant des armatures d'effort tranchant droites : $\alpha = 90^\circ$

$$\cot g\theta = \frac{1 + \sqrt{1 - 4.\nu_0\left(\nu_0 - \cot g\alpha\right)}}{2.\nu_0}$$

$$\cot g\theta = \frac{1 + \sqrt{1 - 4.0,441(0,441 - 0)}}{2.0,441} = 1,668$$

$1 \le \cot g\theta \le 2,5$ (valeur recommandée et à utiliser en flexion simple pour l'Annexe nationale française) : $\quad 1 < \cot g\theta = 1,668 < 2,5 \Rightarrow$ Retenu $\boxed{\cot g\theta = 1,66}$.

3.2 Vérification de la compression des bielles de béton

Effort tranchant de calcul maximal pouvant être supporté sans provoquer l'écrasement des bielles de béton comprimé :

$$\begin{cases} V_{Rd,\,max} = b_w . z . \nu_1 . f_{cd} \dfrac{\cot g\theta + \cot g\alpha}{1 + \cot g^2\theta} \\ z = 0,9.d \end{cases}$$

$\alpha = 90^\circ$ en adoptant des armatures d'âme droites.

$$V_{Rd,\ max} = 0,35.0,9.1,58.0,54.16,7\frac{1,66+0}{1+1,66^2} = 1,984\ MN$$

$V_{Ed} >< V_{Rd,\ max}$ $\qquad$ $\boxed{V_{Ed} = 1,981\ MN < 1,984\ MN = V_{Rd,\ max}\ O.K.}$

3.3 Armatures d'effort tranchant

Calculées :

$$f_{ywd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \qquad f_{ywd} = \frac{500}{1,15} = 435\ MPa$$

α = inclinaison des A_{sw} $\qquad$ A_{sw} droites $\Rightarrow$ $\alpha = 90^\circ$

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{V_{Ed0}}{0,9.d.f_{ywd}\left(\cot g\theta + \cot g\alpha\right)\sin\alpha}$$

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{1,551}{0,9.1,58.435.(1,66+0)1}10^2 = \frac{1}{6,62}\ cm^2/cm$$

Maximales :

$$\frac{A_{sw}.f_{ywd}}{b_w.s} \leq \frac{\frac{1}{2}\nu_1.f_{cd}.\sin\alpha}{1-\cos\alpha} \qquad \frac{A_{sw}}{s} \leq \frac{\frac{1}{2}0,54.16,7.1}{435(1-0)}35 = \frac{1}{2,75}\ cm^2/cm$$

$$\boxed{\frac{A_{sw}}{s} = \frac{1}{6,62}\ cm^2/cm < \frac{1}{2,75}\ cm^2/cm = \left[\frac{A_{sw}}{s}\right]_{max}\ O.K.}$$

Remarque

Si l'on avait utilisé la méthode standard ($\theta = 45^\circ$) :

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{V_{Ed0}}{0,9.d.f_{ywd}\left(\sin\alpha + \cos\alpha\right)} \qquad \frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{1,551}{0,9.1,58.435.1}10^2 = \frac{1}{3,99}\ cm^2/cm$$

$$\frac{A_{sw}.f_{ywd}}{b_w.s} \leq \frac{\frac{1}{2}\nu_1.f_{cd}.\sin\alpha}{1-\cos\alpha}$$

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{1}{3,99}\ cm^2/cm < \frac{1}{2,75}\ cm^2/cm = \left[\frac{A_{sw}}{s}\right]_{max}$$

et l'on se rapprocherait davantage de la section maximale d'armatures d'âme.

3.4 Pourcentage minimal

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s.b_w.\sin\alpha} \geq 0,08\frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}$$

$$\alpha = 90° \qquad \Rightarrow \quad \frac{A_{sw}}{s} \geq 0,08\frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} b_w = 0,08\frac{\sqrt{25}}{500}35 = \frac{1}{35,71}\ cm^2/cm$$

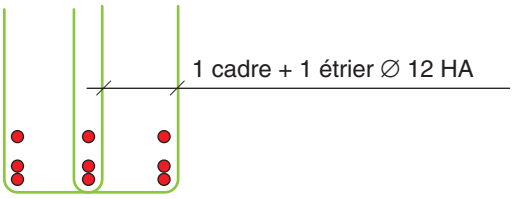
$$\boxed{\frac{A_{sw}}{s} = \frac{1}{6,62}\ cm^2/cm > \frac{1}{35,71}\ cm^2/cm \text{ O.K.}}$$

3.5 Espacement

Prenons $\boxed{\phi_w = 12\ mm}$

$\left(\approx \frac{\phi_l}{3} = \frac{32}{3} = 10,7\ mm\right)$

d'où pour « coudre » trois files verticales dans l'âme :



$A_{sw} = 4.1,13 = 4,52\ cm^2$

$\Rightarrow \quad s_0 = 4,52.6,62 = 29,92\ cm$

Retenons : 1 cadre + 1 étrier ϕ 12 HA :

$s_0 = 29\ cm$

3.5.1 Espacement longitudinal maximal

$$s_{l,\ max} = \text{Min}\begin{cases}0,75.d\left(1+\cot g\alpha\right)\\ 15.\phi \text{ si } A_{s2} \neq 0\end{cases} \qquad s_{l,\ max} = 1,185\ m = 0,75.1,58(1+0)$$

$s_0 >< s_{l,\ max}$ $\qquad \boxed{s_0 = 29\ cm < s_{l,\ max} = 118,5\ cm \quad \text{O.K.}}$

3.5.2 Espacement transversal maximal

$$s_{t,\ max} = \text{Min}\begin{cases}0,75.d\\ 600\ mm\end{cases} \qquad s_{t,\ max} = 0,60\ m = \text{Min}\begin{cases}0,75.1,58 = 1,185\ m\\ 0,60\ m\end{cases}$$

$$s_t = \frac{b_w - 2\left(c_{nom} + \phi_t + \frac{\phi}{2}\right)}{2} \qquad s_t = \frac{35 - 2\left(3 + 1,2 + \frac{3,2}{2}\right)}{2} = 11,7 \text{ cm}$$

$s_t >< s_{t,\,max}$ $\qquad$ $\boxed{s_t = 11,7 \text{ cm} < s_{t,\,max} = 60 \text{ cm} \quad \text{O.K.}}$

4. Vérifications d'about

4.1 Armatures inférieures tendues sur appui d'about

Section :

θ $\qquad$ $\cot g\theta = 1,66 \Rightarrow \theta = 31,06^\circ$

$z = 0,9.d$

$$a_l = \frac{z\left(\cot g\theta - \cot g\alpha\right)}{2} \qquad a_l = \frac{0,9.1,58\ (1,66 - 0)}{2} = 1,18 \text{ m}$$

V_{Ed} $\qquad$ $V_{Ed} = 1,981$ MN (au nu d'appui)

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \qquad f_{yd} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ MPa}$$

A_l = section d'aciers longitudinaux en travée $A_l = 3.5.8,04 = 120,60 \text{ cm}^2$

$$A_s \geq \text{Max}\begin{cases} \beta_2.A_l \text{ avec } \beta_2 = 0,25 \\ \dfrac{F_E}{f_{yd}} = \dfrac{V_{Ed}\dfrac{a_l}{z} + N_{Ed}}{f_{yd}} \end{cases}$$

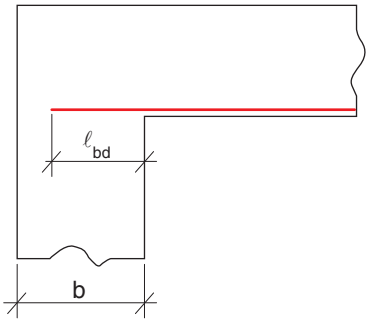
$$A_s \geq 37,79 \text{ cm}^2 = \text{Max}\begin{cases} \dfrac{120,60}{4} = 30,15 \text{ cm}^2 \\ \dfrac{1,981\ \dfrac{1,18}{0,9.1,58} + 0}{435} 10^4 = 37,79 \text{ cm}^2 \end{cases}$$

Comme on avait cinq files de 3 ϕ 32 HA en travée, on garde :

5 ϕ 32 HA inférieurs sur appui :

$A_s = 5.8,04 = 40,20 \text{ cm}^2$

ancrés au-delà du nu d'appui sur :



Remarque pour l'Annexe nationale française

$$A_s \geq \frac{F_E}{f_{yd}} = \frac{V_{Ed}\frac{a_l}{z} + N_{Ed} + \frac{M_{Ed}}{z}}{f_{yd}}$$

$$A_s \geq \frac{1{,}981\ \frac{1{,}18}{0{,}9.1{,}58} + 0 + \frac{0}{0{,}9.1{,}58}}{435} 10^4 = 37{,}79\ \text{cm}^2$$

Soit la valeur recommandée par les Règles EC 2.

On conserve : 5 ϕ 32 HA inférieurs sur appui :

$A_s = 5.8{,}04 = 40{,}20\ \text{cm}^2$

Contrainte à l'origine de l'ancrage :

$$F_E = |V_{Ed}|\frac{a_l}{z} + N_{Ed}$$

$\sigma_{sd} = \dfrac{F_E}{A_s}$ = contrainte de calcul à l'origine de l'ancrage

$$\sigma_{sd} = \frac{1{,}981\ \frac{1{,}18}{0{,}9.1{,}58} + 0}{40{,}20.10^{-4}} = 409\ \text{MPa}$$

Longueur d'ancrage de calcul (voir exercice n° 2 au chapitre 4 : « Dispositions constructives ») :

$\boxed{l_{bd} = 100\ \text{cm}}$

avec :

1 cadre + 1 étrier ϕ 12 HA : s = 29 cm sur l_{bd}

4.2 Vérification du béton de la bielle d'about

Inclinaison de la bielle d'about :

$$\sin\theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{l_{bd}}{z}\right)^2}} \qquad \sin\theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{100}{0{,}9.158}\right)}} = 0{,}818 \Rightarrow \theta = 54{,}88°$$

Contrainte de la bielle d'about :

$$\sigma_{Rd,\,1} = \frac{V_{Ed}}{l_{bd}.b_w.\sin^2\theta} \qquad \sigma_{Rd,\,1} = \frac{1{,}981}{1{,}00.0{,}35.0{,}818^2} = 8{,}46 \text{ MPa}$$

Vérification :

$\sigma_{Rd,\,max} = k_2.\nu'.f_{cd}$

$k_2 = 0{,}85$

$$\nu' = 1 - \frac{f_{ck}}{250} \qquad \nu' = 1 - \frac{25}{250} = 0{,}9$$

$\sigma_{Rd,\,max} = 0{,}85.0{,}9.16{,}7 = 12{,}78$ MPa

$\sigma_{Rd,\,1} >< \sigma_{Rd,\,max}$ $\quad \boxed{\sigma_{Rd,\,1} = 8{,}46 \text{ MPa} < 12{,}78 \text{ MPa} = \sigma_{Rd,\,max} \quad \text{O.K.}}$

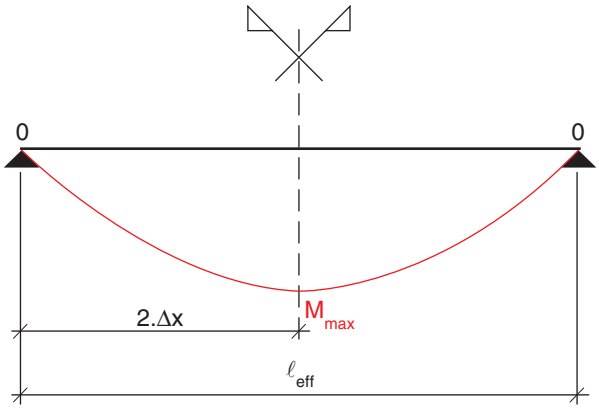
5. Talon de la poutre

5.1 Vérification de la compression des bielles

5.1.1 Introduction

Distance entre le point de moment maximal et le point de moment nul :

La poutre reposant sur un appareil d'appui, les raisonnements seront conduits à partir de la portée effective de la poutre.



Longueur de poutre à considérer :

$$\Delta x \le \frac{1}{2}.\frac{l_{eff}}{2} \qquad \Delta x \le \frac{15{,}00}{4} = 3{,}75 \text{ m}$$

5.1.2 Variation de l'effort de compression dans la dalle sur la longueur Δx

Compte tenu de la variation parabolique du moment fléchissant, on s'intéressera à la zone de poutre comprise entre l'appui et la section d'abscisse Δx pour laquelle cette variation est la plus grande.

Moment maximal (section à $\frac{l_{eff}}{2}$) :

$$M_{Ed} = \frac{p_u . l_{eff}^2}{8} \qquad M_{Ed} = \frac{271,71.15,00^2}{8} = 7\,641,84 \text{ mkN}$$

Effort de compression dans la section d'abscisse Δx (à $\frac{l_{eff}}{4}$) :

$$M_{Ed} = \frac{p_u . \Delta x \left(l_{eff} - \Delta x\right)}{2} \qquad M_{Ed} = \frac{271,71.3,75(15,00 - 3,75)}{2} = 5\,731,38 \text{ mkN}$$

$$M_{Tu} = b_{eff} . h_f . f_{cd} \left(d - \frac{h_f}{2}\right)$$

$$M_{Tu} = 2,60.0,16.16,7\left(1,58 - \frac{0,16}{2}\right) = 10,421 \text{ mMN}$$

$M_{Ed} >< M_{Tu}$ $\qquad$ $M_{Ed} = 5,731 \text{ mMN} < 10,421 \text{ mMN} = M_{Tu}$

$\Rightarrow$ section rectangulaire de largeur b_{eff}.

$$\mu_{cu} = \frac{M_{Ed}}{b_{eff} . d^2 . f_{cd}} \qquad \mu_{cu} = \frac{5,73138}{2,60.1,58^2.16,7} = 0,053$$

$$\alpha_u = \frac{1}{\lambda}\left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{cu}}\right] \qquad \alpha_u = \frac{1}{0,8}\left[1 - \sqrt{1 - 2.0,053}\right] = 0,068$$

$$x_u = \alpha_u . d \qquad x_u = 0,068.1,58 = 0,107 \text{ m}$$

$$F_{cd} = \lambda . b_{eff} . x_u . f_{cd} \qquad F_{cd} = 0,8.2,60.0,107.16,7 = 3,717 \text{ MN}$$

$$F_s = F_{cd} \qquad F_s = 3,717 \text{ MN}$$

5.1.3 Effort de glissement moyen sur la longueur Δx

b_{eff} $\qquad$ $b_{eff} = 2,60 \text{ m}$

$\Delta F = F_s - 0$ $\qquad$ $\Delta F = 3,717 \text{ MN}$

A_{s1} = section des barres longitudinales situées dans une saillie du talon : A_{s1} : 3 ϕ 32 HA

A_s = section de l'ensemble des barres longitudinales situées dans le talon A_s : 15 ϕ 32 HA (9 barres dans l'âme et 3 barres dans chaque saillie du talon).

$$\Delta x = \frac{1}{2}.\frac{l_{eff}}{2} \qquad \Delta x = \frac{15,00}{4} = 3,75 \text{ m}$$

$$g_{Ed} = \frac{\Delta F_d}{\Delta x} = \Delta F \frac{A_{s1}}{A_s}.\frac{1}{\Delta x} \qquad g_{Ed} = 3,717 \frac{3}{15}.\frac{1}{3,75} = 0,198 \text{ MN/m}$$

5.2 Armatures de liaison de l'âme à la membrure

$1 \le \cot g\theta_f \le 1,25$ dans la membrure tendue.

Pour la valeur maximale de θ_f, nous avons $\cot g\theta_f$ minimal et par conséquent $\frac{A_{sf}}{s_f}$ maximal.

Prenons : $\cot g\theta_f = 1,5 \Rightarrow \theta_f = 38,68°$

$$\frac{A_{sf}}{s_f} \ge \frac{g_{Ed}}{f_{yd}.\cot g\theta_f} \qquad \frac{A_{sf}}{s_f} \ge \frac{0,198}{435.1,25}10^2 = \frac{1}{27,46} \text{ cm}^2/\text{cm}$$

Prenons : 1 cadre ϕ 12 HA

$A_{sf} = 2.1,13 = 2,26 \text{ cm}^2$

$\Rightarrow s_f = 2,26.27,46 = 62,06$ cm

$\Rightarrow$ Retenu : 1 cadre ϕ 12 HA : $s_f = 62$ cm

Remarque

L'écart entre l'espacement des cadres de talon et celui des armatures d'âme étant important, nous ne prendrons pas le même espacement pour les deux systèmes d'armatures :

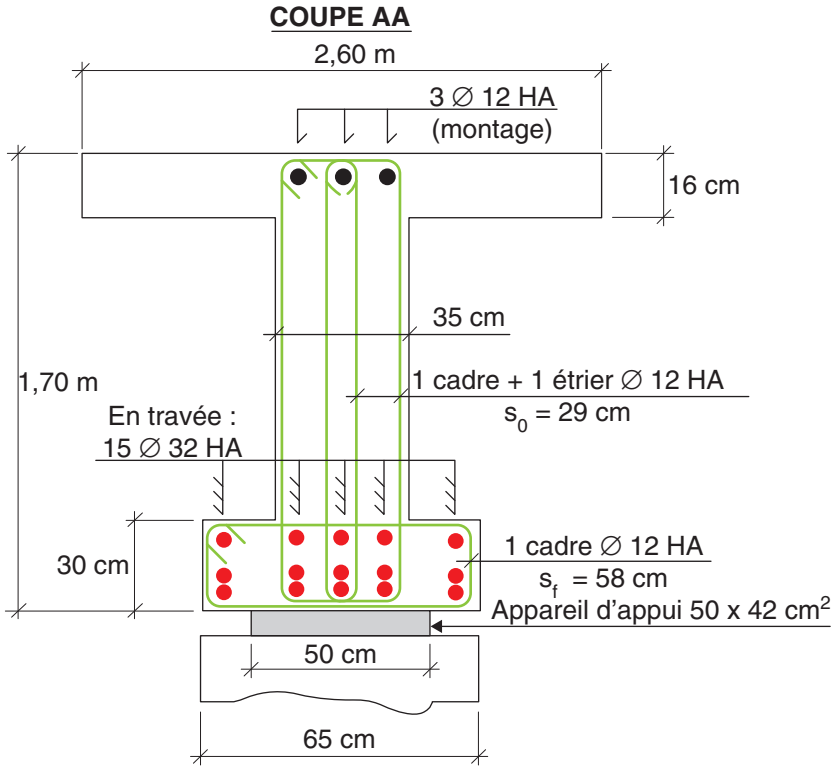
$\Rightarrow s_f = 62$ cm >> $s_0 = 29$ cm

$\Rightarrow$ Retenu pour faciliter la mise en place des armatures transversales :

$\Rightarrow s_f = 2.s_0 = 58$ cm

$\Rightarrow$ 1 cadre f 12 HA : sf = 58 cm

6. Schéma de ferraillage

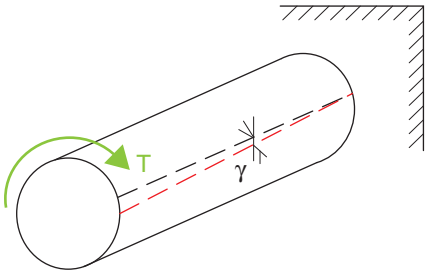


9 Torsion

I. RAPPELS THÉORIQUES

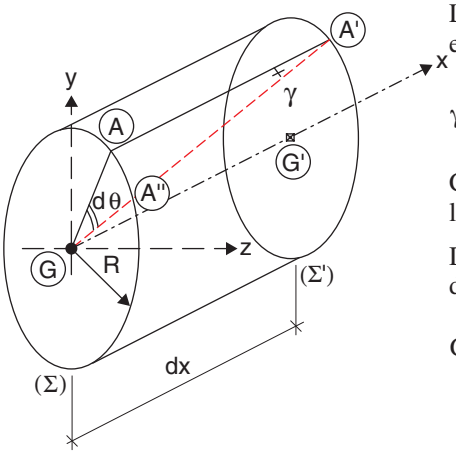
1. Rappels de résistance des matériaux

1.1 Contraintes engendrées par un couple de torsion



Un couple de torsion T appliqué à l'extrémité libre d'une barre circulaire encastrée produit une distorsion γ des génératrices de la barre.

Sous l'action du couple de torsion T, la section (Σ) subit une rotation dθ dans son plan :



La rotation relative de (Σ) par rapport à (Σ') est :

$$\gamma = \frac{AA''}{AA'} = R\frac{d\theta}{dx}$$

Cette rotation est en fait la distorsion de l'angle droit en A'.

D'après la théorie de l'élasticité il apparaît donc une contrainte de cisaillement :

$$G = -\frac{\tau}{\gamma} \Rightarrow -\frac{\tau}{G} = R\frac{d\theta}{dx} \qquad [9.1]$$

Les contraintes développées par le couple de torsion T sont donc des contraintes de cisaillement (τ).

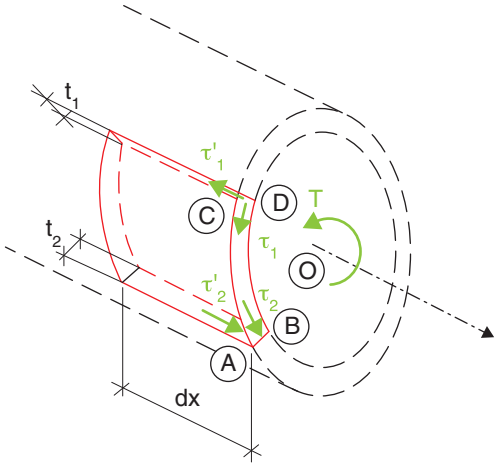
$$\tau = -G.\gamma \qquad [9.2]$$

G = module d'élasticité transversal du matériau constitutif de la barre.

1.2 Torsion des profils creux

1.2.1 Flux du vecteur contrainte

Considérons un élément de profil creux de section ABCD et de longueur dx découpé dans l'épaisseur du profil :



Les contraintes tangentes sur deux facettes orthogonales étant égales, on a :

$\tau'_1 = \tau_1$ et $\tau'_2 = \tau_2$

La projection des forces élastiques suivant Ox donne, en l'absence de toute contrainte normale :

$$\int_A^B \tau_2.dx.dy - \int_C^D \tau_1.dx.dy = 0$$

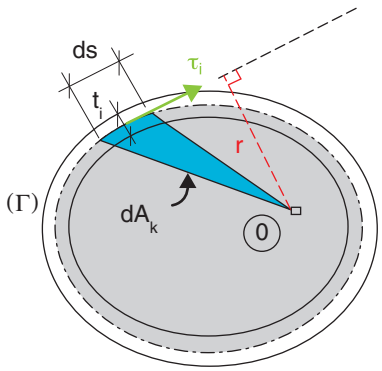
Soit, en admettant que les contraintes de cisaillement τ sont constantes dans l'épaisseur t du tube mince :

$$\tau_2.t_2 - \tau_1.t_1 = 0$$

et comme les points A, B et C, D ont été choisis arbitrairement :

$$\boxed{\tau_1.t_1 = \ldots = \tau_i.t_i = \Phi = \text{Cste}} \qquad [9.3]$$

1.2.2 Valeur de la contrainte tangente



Γ étant le contour tracé à mi-épaisseur de la paroi du tube mince, l'équilibre de la section droite s'écrit (moments en un point O en principe quelconque, en pratique centre de gravité de la section droite) :

$$T = \int_{(\Gamma)} \underbrace{(\tau_i.t_i)}_{\Phi = Cste}.r.ds = \Phi \int_{(\Gamma)} r.ds$$

soit en remarquant que $r.ds = 2.dA_k$ où dA_k représente l'aire du triangle bleu sur la figure :

$\int_{(\Gamma)} r.ds = 2.A_k$ où A_k est l'aire délimitée par la courbe Γ,

il vient :

$$T = \Phi.2A_k = \tau_i.t_i.2.A_k$$

si $t_i = Cste = t$, on a :

$$\tau_i = \frac{\Phi}{t} = \frac{T}{2.t.A_k} = Cste \qquad [9.4]$$

1.2.3 Rigidité à la torsion d'un profil creux

En intégrant la relation [9.1], le long de la courbe (Γ) :

$$-\int_{(\Gamma)} \frac{\tau}{G} ds = \frac{d\theta}{dx} \underbrace{\int_{(\Gamma)} r.ds}_{2.A_k} = 2.A_k \frac{d\theta}{dx} \Rightarrow \int_{(\Gamma)} \tau.ds = -2.G.A_k \frac{d\theta}{dx}$$

Ce qui s'écrit compte tenu de la définition du flux de cisaillement (équation [9.3]) :

$$\int_{(\Gamma)} \frac{\Phi}{t} ds = -2.G.A_k \frac{d\theta}{dx}$$

Soit, en faisant intervenir la valeur de la contrainte tangente dans le profil creux :

$$\frac{T}{2.A_k}\int_{(\Gamma)}\frac{ds}{t} = -2.G.A_k\frac{d\theta}{dx} \quad \Rightarrow \quad \frac{d\theta}{dx} = -\frac{T}{4.G.A_k^2}\int_{(\Gamma)}\frac{ds}{t}$$

On définit la rigidité à la torsion d'un profil creux K par :

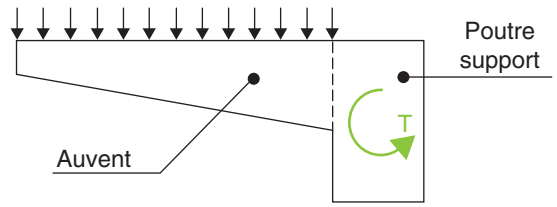
$$\boxed{\frac{d\theta}{dx} = -\frac{T}{G.K} \qquad K = \frac{4.A_k^2}{\int_{(\Gamma)}\frac{ds}{t}}} \qquad [9.5]$$

1.3 Torsion d'équilibre et torsion de compatibilité

Si quel que soit l'état de déformation et de fissuration de la pièce sollicitée en torsion, le couple de torsion reste invariable, la résistance doit être assurée par un ferraillage approprié. On dit alors que l'on se trouve dans le cas de la torsion d'équilibre[1].

Exemple

Poutre encastrée à ses deux extrémités supportant un auvent :



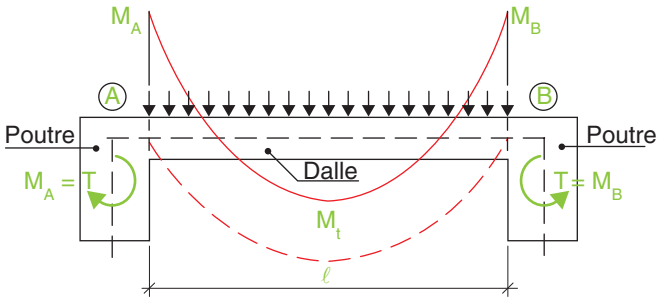
Le moment de flexion à l'encastrement de l'auvent dans la poutre produit un couple de torsion dans cette dernière.

Si au contraire, le couple de torsion diminue lorsque la déformation et/ou la fissuration de la pièce sollicitée en torsion augmentent, il doit être tenu compte de l'effet de la torsion dans le calcul des éléments auxquels la pièce est liée, mais non dans le calcul de la pièce elle-même. On dit alors que l'on se trouve dans le cas de la torsion de compatibilité[2].

Exemple

Dalle encastrée dans deux poutres parallèles :

1. EC 2 – 6.3.1 (1)P
2. EC 2 – 6.3.1 (2)



Le moment d'encastrement de la dalle dans les poutres produit un couple de torsion dans ces dernières :

$$-\frac{pl^2}{12} \leq (M_A \text{ ou } M_B) \leq 0$$

Si les poutres se fissurent par torsion, leur raideur diminue (dans un rapport de 10 à 1 environ) et :

M_A et $M_B \rightarrow 0$

$M_t = \mu\left(\frac{l}{2}\right) + \frac{M_A + M_B}{2}$ croît jusqu'à $M_t = \mu\left(\frac{l}{2}\right)$

2. Sections à considérer

2.1 Cas des sections creuses

La contrainte tangente, pour des sections de forme convexe, a pour expression[3] :

$$\tau_{t,\,i} = \frac{T_{Ed}}{2.t_{ef,\,i}.A_k} \qquad \textbf{(6.26)}$$

où :

T_{Ed} = couple de torsion,

$t_{ef,\,i}$ = épaisseur de la paroi au point i considéré,

A_k = aire limitée par le contour tracé à mi-épaisseur des parois (surface de la partie creuse comprise).

2.2 Cas des sections pleines

On se ramène au cas précédent en remplaçant la section réelle par une section creuse équivalente d'épaisseur fictive vérifiant[4] :

$$2c \leq t_{ef,\,i} \leq \frac{A}{u} \qquad [9.6]$$

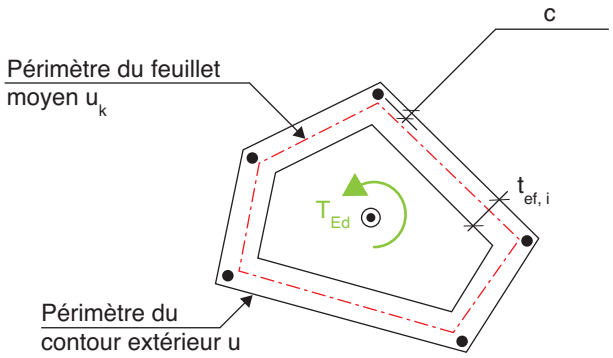
3. EC 2 – 6.3.2 (1)
4. EC 2 – 6.3.2 (1)

avec :

c = distance de l'axe des barres longitudinales à la paroi la plus proche,

A = surface totale de la section délimitée par le périmètre extérieur, aires des parties creuses fictives comprises,

u = périmètre extérieur de la section.



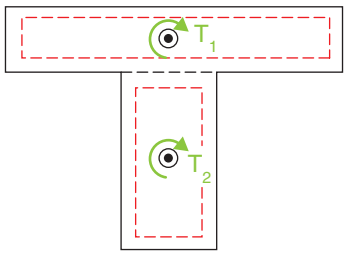
La contrainte tangente a pour expression :

$$\tau_{t,\,i} = \frac{T_{Ed}}{2.t_{ef,\,i}.A_k} \qquad \textbf{(6.26)}$$

A_k = aire délimitée par le feuillet moyen des parois (surface de la partie creuse fictive comprise).

2.3 Cas des sections de forme complexe

Les sections de forme complexe (sections en T par exemple) sont décomposées en sections rectangulaires élémentaires creuses[5].



Le couple de torsion appliqué est réparti entre les différentes sections creuses élémentaires :

- équilibre global du couple de torsion : $T = \sum_i T_i$;

5. EC 2 – 6.3.1 (3)

• compatibilité de la déformation de torsion :

$$\frac{d\theta}{dx} = -\frac{T_1}{G.K_1} = \ldots = -\frac{T_i}{G.K_i} = \ldots = -\frac{\sum_i T_i}{G.\sum_i K_i} = -\frac{T}{G.\sum_i K_i}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{\forall\, j : T_j = \frac{K_j}{\sum_i K_i} T} \qquad [9.7]$$

avec :
G = module d'élasticité transversal,

$$K_i = \frac{4.A_{ki}^2}{\int_{(\Gamma_i)} \frac{ds}{t}},$$

(Γ_i) = contour du feuillet moyen de la section creuse élémentaire i,

A_{ki}= aire limitée par le feuillet moyen des parois de la section creuse élémentaire i, aire des parties creuses comprises.

3. Principes de la justification à la torsion

3.1 Couples de torsion résistants

Le calcul est basé sur la méthode de l'inclinaison variable des bielles (voir § 4.4.1 du chapitre 8 : « Effort tranchant ») en adoptant[6] :

$$\begin{cases} \alpha = 90° \\ 1 \le \cot g\theta \le 2{,}5 \quad \Leftrightarrow \quad 21°8 \le \theta \le 45° \end{cases} \qquad \textbf{(6.7N)}$$

en cas de traction, l'Annexe nationale française préconise :

$$\boxed{\sqrt{1 + \frac{\sigma_{ct}}{f_{ctm}}} \le \cot g\theta \le 2{,}5\sqrt{1 + \frac{\sigma_{ct}}{f_{ctm}}}}. \qquad \textbf{(6.7bNF)}$$

avec : $\sigma_{ct}\,(< 0)$: contrainte de traction au niveau du centre de gravité de la section.

Compte tenu de la valeur de la contrainte tangente des profils creux, les équations [8.3] de la règle des coutures généralisée s'écrivent avec τ_R = contrainte tangente de torsion[7] :

6. EC 2 – 6.2.3 (2) + voir AN
7. EC 2 – 9.2.3 (1)

$$\begin{cases} \sigma_c = \dfrac{v_R}{\sin^2\theta\left(\cot g\theta + \cot g\alpha\right)} \\ \rho_w.\sigma_{sw} = \dfrac{v_R}{\sin^2\alpha\left(\cot g\theta + \cot g\alpha\right)} \\ \rho_w = \dfrac{A_{sw}}{s.b_w.\sin\alpha}\ ;\ b_w = t_{ef,\,i} \\ \alpha = 90° \\ v_R = \tau_R = \dfrac{T}{2.t_{ef,\,i}.A_k} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \sigma_c = \dfrac{T}{2.t_{ef,\,i}.A_k\ \underbrace{\sin^2\theta\ .\cot g\theta}_{\frac{1}{1+\cot g^2\theta}}} = \dfrac{T\left(1+\cot g^2\theta\right)}{2.t_{ef,\,i}.A_k.\cot g\theta} \\ \dfrac{A_{sw}}{s.t_{ef,\,i}}\sigma_{sw} = \dfrac{T}{2.t_{ef,\,i}.A_k.\cot g\theta} \end{cases} \qquad [9.8]$$

En limitant la contrainte de compression des bielles de béton de sorte que[8] :

$$\sigma_c \le \nu.\alpha_{cw}.f_{cd}$$

la première équation donne la valeur $T_{Rd,\,max}$ du couple maximal de torsion auquel peuvent résister les bielles de béton comprimées :

$$T_{Rd,\,max} = 2.\nu.\alpha_{cw}.f_{cd}.t_{ef,\,i}.A_k\frac{\cot g\theta}{1+\cot g^2\theta} = 2.\nu.\alpha_{cw}.f_{cd}.t_{ef,\,i}.A_k\frac{1}{\dfrac{1}{\cot g\theta}+\cot g\theta}$$

$$T_{Rd,\,max} = 2.\nu.\alpha_{cw}.f_{cd}.t_{ef,\,i}.A_k\frac{1}{\dfrac{\sin\theta}{\cos\theta}+\dfrac{\cos\theta}{\sin\theta}}$$

$$\Rightarrow \quad T_{Rd,\,max} = 2.\nu.\alpha_{cw}.f_{cd}.t_{ef,\,i}.A_k\sin\theta.\cos\theta \qquad [9.9]\ \textbf{(6.30)}$$

3.2 Principe de la justification

À l'ELU, le couple de torsion agissant de calcul T_{Ed} doit être au plus égal au couple de torsion résistant de calcul $T_{Rd,\,max}$:

$$T_{Ed} \le T_{Rd,\,max} \qquad [9.10]$$

8. EC 2 – 6.3.2 (4)

4. Vérification de la compression des bielles de béton

Il faut vérifier[9] :

$$T_{Ed} \leq T_{Rd,\,max} = 2.\nu.\alpha_{cw}.f_{cd}.t_{ef,\,i}.A_k.\sin\theta.\cos\theta \qquad [9.11]\ \textbf{(6.30)}$$

avec comme valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[10] :

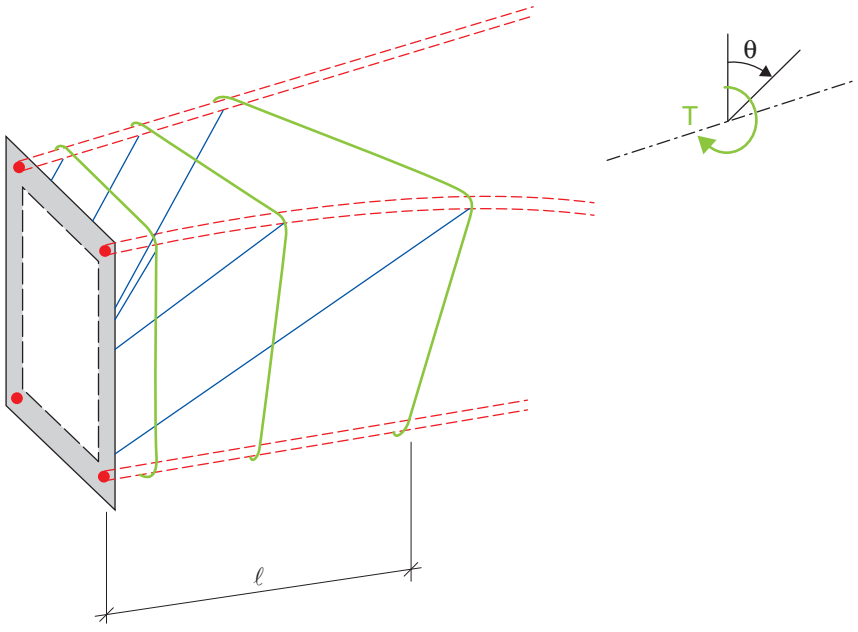
$$\nu = 0,6\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad \text{où } f_{ck} \text{ est en MPa,} \qquad \textbf{(6.6N)}$$

$$\alpha_{cw} = 1 \quad \text{pour les structures non précontraintes,} \qquad \textbf{(6.11.aN)}$$

$$1 \leq \cot g\theta \leq 2,5 \ .$$

Remarque

Du fait de la rotation de torsion, les parois, initialement planes, se déforment en paraboloïdes hyperboliques ce qui entraîne une mise en flexion des bielles. Ce qui explique la réduction du coefficient d'efficacité ν de l'ordre de 40 %.



9. EC 2 – 6.3.2 (4)
10. EC 2 – 6.2.2 (6)

5. Armatures

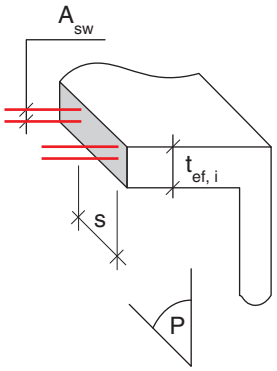
Les armatures pour la torsion se composent d'un double système :

- armatures transversales droites ;
- armatures longitudinales.

5.1 Armatures transversales

5.1.1 Calcul des armatures

En appliquant la règle des coutures (seconde expression [9.8]) aux plans perpendiculaires aux parois, il faut vérifier[11] :



$$\frac{A_{sw}}{s} f_{ywd} \geq \frac{T_{Ed}}{2.A_k.\cot g\theta} \qquad [9.12]$$

avec :

f_{ywd} = limite élastique des armatures transversales,

A_{sw} = somme des brins d'armatures transversales contenus dans l'épaisseur $t_{ef,\,i}$,

s = espacement des armatures transversales.

Remarque

Le couple de torsion produit, dans l'épaisseur de la paroi creuse, un effort :

$$V_{Ed_i} = \underbrace{\tau_{t,\,i}.t_{ef,\,i}}_{\frac{T_{Ed}}{2.A_k}}.z_i \qquad \textbf{(6.27)}$$

avec z_i = longueur totale de la paroi i d'épaisseur $t_{ef,\,i}$.

11. EC 2 – 6.3.2 (2)

Pour équilibrer cet effort tranchant, il faut une section d'armatures transversales (voir § 4.4.3 du chapitre 8 : « Effort tranchant ») :

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{V_{Ed}}{z.f_{ywd}(\cot g\theta + \cot g\alpha)\sin\alpha} \qquad \textbf{(6.13)}$$

avec : z = hauteur utile de la paroi i d'épaisseur $t_{ef,\,i}$.

Comme les armatures transversales sont normales à la ligne moyenne de la poutre, $\alpha = 90^\circ$ et :

$$\frac{A_{sw}}{s} f_{ywd} \geq \frac{T_{Ed}.z_i}{z.2.A_k.\cot g\theta}$$

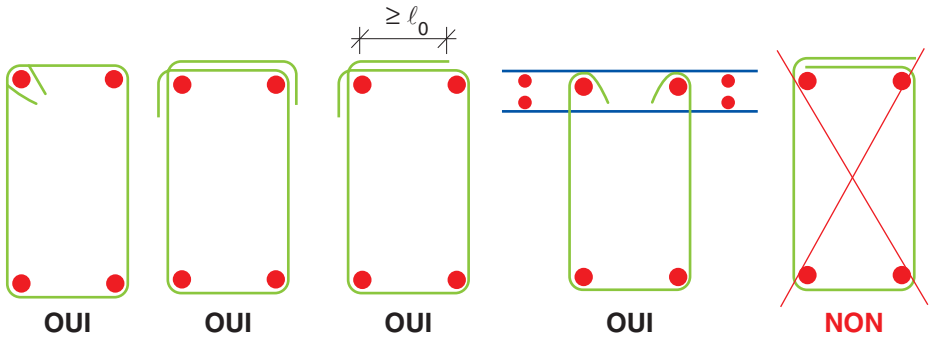
Pour $z_i \approx z$, on retrouve l'expression de la règle des coutures (seconde équation [9.8]) :

$$\boxed{\frac{A_{sw}}{s} f_{ywd} \geq \frac{T_{Ed}}{2.A_k.\cot g\theta}}$$

5.1.2 Dispositions constructives

Les cadres de torsion doivent être[12] :

- ancrés au moyen de recouvrements ou de crochets ;
- perpendiculaires à l'axe de l'élément.



Pourcentage minimal comme pour l'effort tranchant (voir § 4.4.4 du chapitre 8 : « Effort tranchant ») avec dans chaque paroi[13] (puisque $b_w = t_{ef,\,i}$ et $\alpha = 90^\circ$) :

$$\boxed{\rho_w = \frac{A_{sw}}{s.t_{ef,\,i}} \geq 0,08\frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}} \qquad [9.13]\ \textbf{(9.4)}$$

12. EC 2 – 9.2.3 (1)
13. EC 2 – 9.2.3 (2) + 9.2.2 (5)

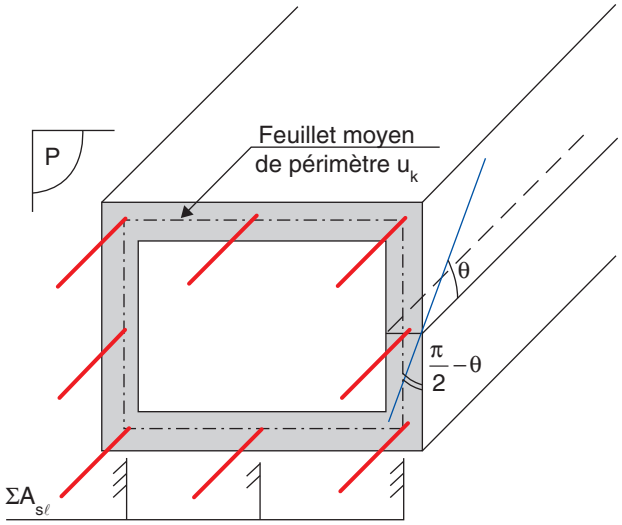
Espacement maximal[14] :

$$s \le s_{l,\,max} = \text{Min}\begin{cases} 0{,}75.d\,(1 + \text{cotg}\alpha) : \text{valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française,} \\ \dfrac{u}{8} \\ \text{plus petite dimension de la section de droite} \end{cases} \qquad [9.14]$$

5.2 Armatures longitudinales

5.2.1 Calcul des armatures

En appliquant la règle des coutures (seconde expression [9.8]) au plan de la section droite de la pièce, il faut vérifier[15] :



$$T_{Ed} \le 2.A_k.f_{yd}\,\frac{\sum A_{sl}}{u_k}\,\text{cotg}\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \Rightarrow$$

$$\sum A_{sl}.f_{yd} \ge \frac{T_{Ed}.u_k}{2.A_k}\,\text{cotg}\theta \qquad [9.15]\ \textbf{(6.28)}$$

14. EC 2 – 9.2.3 (3) + 9.2.2 (6) + voir AN
15. EC 2 – 6.3.2 (3)

avec :

$\sum A_{sl}$ = section complémentaire d'armatures longitudinales nécessaire pour la torsion,

u_k = périmètre de l'aire A_k,

f_{yd} = limite élastique de calcul des armatures longitudinales.

Lorsque les armatures transversales et longitudinales sont déterminées, l'inclinaison définitive θ des bielles est obtenue en écrivant que les moments résistants de torsion dont sont capables les cadres d'une part et les armatures longitudinales d'autre part sont égaux :

$$T_{Ed} = 2.A_k.f_{ywd}\frac{A_{sw}}{s}\cot g\theta = 2.A_k.f_{yd}\frac{\sum A_{sl}}{u_k}tg\theta$$

$$\Rightarrow \quad tg^2\theta = \frac{A_{sw}}{\sum A_{sl}}.\frac{u_k}{s}.\frac{f_{ywd}}{f_{yd}}$$

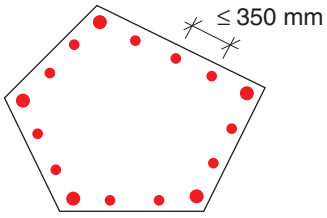
$$\Rightarrow \quad T_{Ed} = 2.A_k\sqrt{\left(\frac{A_{sw}}{s}f_{ywd}\right).\left(\frac{\sum A_{sl}}{u_k}f_{yd}\right)}$$

si $tg\theta \notin [1\,;2{,}5]$ prendre la limite la plus proche.

5.2.2 Dispositions constructives

Une barre longitudinale au moins dans chaque angle[16].

L'espacement des barres longitudinales doit vérifier :



5.2.3 Remarque – Torsion combinée à une flexion simple ou composée

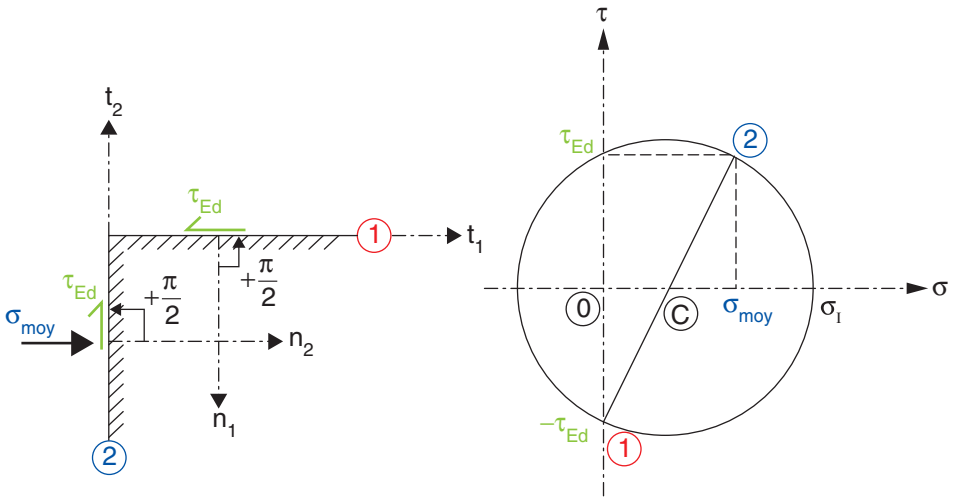
Lorsque le moment de flexion concomitant à la torsion est élevé, la contrainte principale de compression est définie à partir de :

σ_{moy} = contrainte de compression longitudinale moyenne due à la flexion,

16. EC 2 – 9.2.3 (4)

$\tau_{Ed} = \dfrac{T_{Ed}}{2.t_{ef,\,i}.A_k}$ = contrainte tangente de torsion,

par le cercle de Mohr :



$$\left.\begin{aligned} OC &= \frac{\sigma_{moy}}{2} \\ R^2 &= \left(\frac{\sigma_{moy}}{2}\right)^2 + \tau_{Ed}^2 \end{aligned}\right\} \Rightarrow \sigma_I = OC + R = \frac{\sigma_{moy}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{moy}}{2}\right)^2 + \tau_{Ed}^2}$$

d'où :

$$\boxed{\sigma_I = \frac{\sigma_{moy} + \sqrt{\sigma_{moy}^2 + 4.\tau_{Ed}^2}}{2}} \qquad [9.16]$$

6. Sollicitations combinées

Dans le cas où les sollicitations de torsion et de flexion sont concomitantes[17] :

- la section des aciers longitudinaux de torsion situés dans la zone tendue par la flexion s'ajoute à celle des aciers tendus de flexion ;

17. EC 2 – 6.3.2 (3)

- la section des aciers longitudinaux de torsion situés dans la zone comprimée par la flexion vient en déduction de celle des aciers comprimés éventuels (le signe du résultat n'a aucune importance).

6.1 Cas général

Pour une section pleine ou creuse, il faut vérifier[18] :

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,\,max}} + \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,\,max}} \leq 1 \qquad \text{[9.17] } \textbf{(6.29)}$$

avec :

T_{Ed} = moment de torsion de calcul (résultat de RdM),

V_{Ed} = effort tranchant concomitant,

$$T_{Rd,\,max} = 2.\nu.\alpha_{cw}.f_{cd}.A_k.t_{ef,\,i}.\sin\theta.\cos\theta \qquad \textbf{(6.30)}$$

$$V_{Rd,\,max} = b_w.z.\nu_1.f_{cd}\,\frac{\cot g\theta + \cot g\alpha}{1 + \cot g^2\theta} \qquad \textbf{(6.14)}$$

avec comme valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[19] :

$$\nu_1 = \nu = 0{,}6\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \text{ avec } f_{ck} \text{ en MPa.} \qquad \textbf{(6.6N)}$$

Pour les ponts :

la règle précédente s'applique aux sections pleines,

- pour les caissons :
  - la vérification pour les efforts combinés est à faire séparément pour chaque paroi ;
  - la résistance du béton est basée sur l'effort tranchant de calcul[20] $V_{Rd,\,max}$.

6.2 Cas des sections pleines quasi rectangulaires

Dans le cas où[21] :

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,\,c}} + \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,\,c}} \leq 1 \qquad \textbf{(6.31)}$$

avec :

18. EC 2 – 6.3.2 (4)
19. EC 2 – voir AN
20. EC 2 – 6.3.2 (104)
21. EC 2 – 6.3.2 (5)

$V_{Rd,\,c}$ obtenu par l'équation [8.11] du § 3.2.1 au chapitre 8 : « Effort trancnant »,

$T_{Rd,\,c} = 2.A_k.t_{ef,\,i}.f_{cd}$: moment de fissuration en torsion obtenu pour $\tau_{t,\,i} = f_{ctd}$ par l'équation (6.26) du § 2.1,

mettre le pourcentage minimal d'armatures longitudinales (voir § 7 du chapitre 7 : « Flexion simple ») et transversales (voir § 3.4 du chapitre 8 : « Effort tranchant ») requis.

Dans le cas contraire (inégalité (6.31) non vérifiée) calculer les armatures longitudinales comme indiqué au § 5.2.1 et les armatures transversales comme indiqué au § 6.3.

6.3 Remarque

Les cadres sont calculés séparément pour chacune des deux sollicitations en adoptant le même angle θ pour les bielles de béton, puis ajoutées. Dans ces conditions, les armatures transversales d'effort tranchant et de torsion combinées sont définies par[22] :

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{A_{swV}}{s_V} + \frac{A_{swT}}{s_T} \qquad [9.18]$$

avec, dans l'épaisseur $t_{ef,\,i}$ de la section creuse fictive ou réelle :

A_{swV} = section d'un cours d'armatures d'effort tranchant espacées de s_V,

A_{swT} = section d'une nappe d'armatures transversales de torsion espacées de s_T,

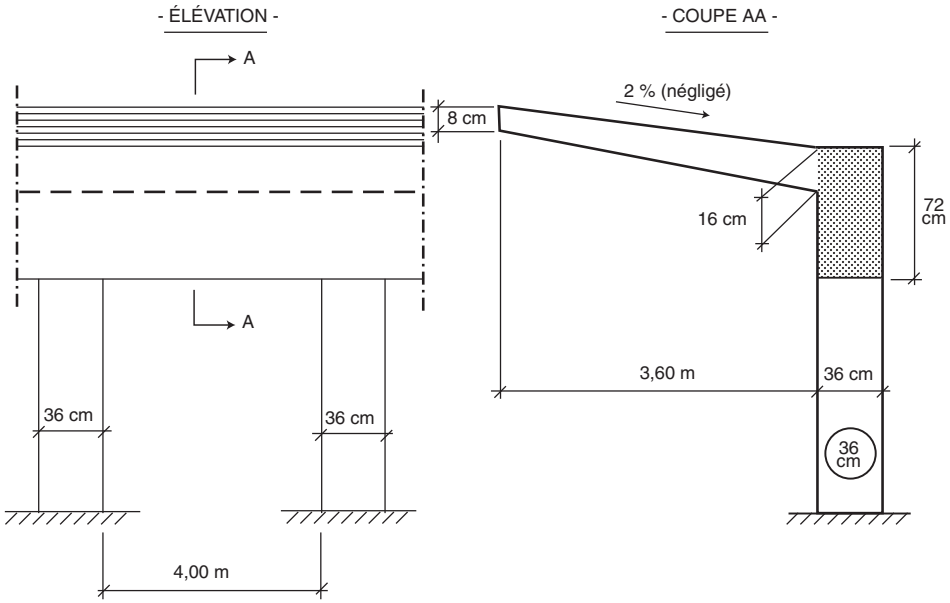
A_{sw} = section d'armature transversale combinée espacée de s.

22. EC 2 – 6.3.2 (2)

II. APPLICATIONS

Application n° 1 : poutre supportant un auvent

–Enoncé–



Actions variables :

q = 1 kN/m^2 en projection verticale.

Matériaux :

- béton : f_{ck} = 25 MPa,
- aciers : S 500 B, diagramme σ–ε à palier incliné $\left(\varepsilon_{uk} = 5\,\%\right)$.
- Enrobage des armatures : c_{nom} = 3 cm.
- Maîtrise de la fissuration non requise.
- Pour la poutre 0,72.0,36 m^2, on se propose :

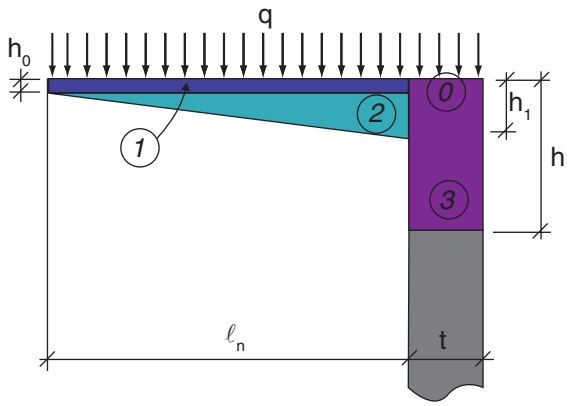
1/ d'évaluer les sollicitations extrêmes,
2/ de faire la vérification de la compression des bielles de béton,
3/ de calculer les armatures longitudinales,
4/ de déterminer les armatures transversales.

–Corrigé–

1. Sollicitations dans la poutre d'appui de l'auvent

1.1. Descente de charges

En négligeant la pente de l'extrados de l'auvent et en prenant les moments au centre de gravité de la poutre 0,72.0,36 m^2, on obtient pour une bande d'auvent de largeur unité :



$l_n = 3,60$ m,
$h = 0,72$ m,
$t = 0,36$ m,
$h_0 = 0,08$ m,
$h_1 = 0,16$ m,
$q = 1$ kN/m^2,

Portée à prendre en compte (voir § 2.3, chapitre 1 : « Analyse structurale », *Maîtrise de l'eurocode 2*, J. Roux, Éditions Eyrolles, 2009) :

$$l_{eff} = l_n + \text{Min}\begin{cases}\frac{h_1}{2}\\ \frac{t}{2}\end{cases} \qquad l_{eff} = 3,60\text{ m} + \text{Min}\begin{cases}\frac{0,16}{2} = 0,08\text{ m}\\ \frac{0,36}{2} = 0,18\text{ m}\end{cases} = 3,68\text{ m}.$$

Élément	p (kN/m)	x/O (m)	p.x/O (mkN/m)
①	25.0,08.3,60 = 7,20	$\frac{3,60}{2} + \frac{0,36}{2} = 1,98$	14,26
②	$25\,\frac{1}{2}$ 0,08.3,60 = 3,60	$\frac{3,60}{3} + \frac{0,36}{2} = 1,38$	4,97
③	25.0,72.0,36 = 6,48	0	0
Total permanent	g = 17,28		t_g = 19,23
Total variable	1(3,60 + 0,36) = q = 3,96	$\frac{3,96}{2} - \frac{0,36}{2} = 1,80$	t_q= 7,13

1.2. Moment fléchissant dans le auvent

$p_u = 1,35.g + 1,5.q$ $\qquad$ $p_u = 1,35.17,28 + 1,5.3,96 = 29,3$ kN/m

La poutre étant encastrée dans les poteaux, on obtient aux encastrements un moment (maximal en valeur absolue) :

l_n = portée entre nus d'appuis : $l_n = 4{,}00$ m

$$M_{Ed} = -\frac{p_u.l_n^2}{12} \qquad M_{Ed} = -\frac{29{,}3.4{,}00^2}{12} = -\ 39{,}07 \text{ mkN}$$

1.3. Effort tranchant dans le auvent

Il est maximal sur appuis :

$$V_{Ed} = \frac{p_u.l_n}{2} \qquad V_{Ed} = \frac{29{,}3.4{,}00}{2} = 58{,}60 \text{ kN}$$

Charges permanentes prépondérantes (cf. g >> q) $\Rightarrow$ réduction pour transmission directe des charges aux appuis :

$d = 0{,}9.h$ $\qquad d = 0{,}9.0{,}72 = 0{,}65$ m

$V_{Ed0} = V_{Ed} - p_u.d$ $\qquad V_{Ed0} = 58{,}60 - 29{,}3.0{,}65 = 39{,}56$ kN

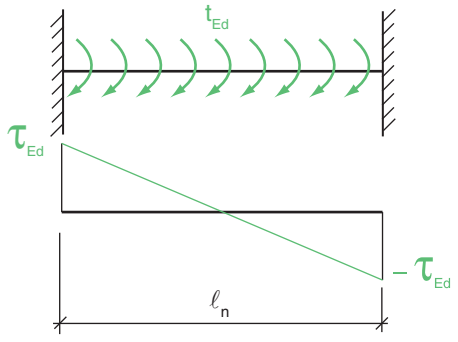
1.4. Couple de torsion

1.4.1. Couple de torsion réparti

$t_u = 1{,}35.t_g + 1{,}5.t_q$ $\qquad t_u = 1{,}35.19{,}23 + 1{,}5.7{,}13 = 36{,}66$ mkN/m

1.4.2. Couple de torsion

La poutre, soumise à un couple uniforme de torsion, est considérée comme encastrée dans les poteaux.



Par analogie avec l'effort tranchant, le couple de torsion maximal est obtenu sur appui :

$$T_{Ed} = t_u \frac{l_n}{2} \qquad T_{Ed} = 36{,}66 \frac{4{,}00}{2} = 73{,}32 \text{ mkN}$$

2. Vérification de la compression des bielles de béton

2.1. Couple de torsion résistant de calcul : $T_{Rd,\,max}$

$$T_{Rd,\,max} = 2.\nu.\alpha_{cw}.f_{cd}.t_{ef,\,i}.A_k.\sin\theta.\cos\theta$$

avec :

$$\nu = 0,6\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \qquad \nu = 0,6\left(1 - \frac{25}{250}\right) = 0,54$$

$$\alpha_{cw} = 1$$

$$f_{cd} = \alpha_{cc}\frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (\alpha_{cc} = 1) \qquad f_{cd} = 1\frac{25}{1,5} = 16,7 \text{ MPa}$$

$1 \le \cot g\theta \le 2,5$ Prenons $\theta = 45^\circ$ pour les bielles de béton comprimé $\Rightarrow$ $\cot g\theta = 1$

$A = b_w.h$ = surface totale de la section : $A = 0,36.0,72 = 0,2592$ m^2

u = périmètre extérieur de la section $u = 2\,(0,36 + 0,72) = 2,16$ m

c = distance de l'axe des barres longitudinales à la paroi la plus proche :

$$c_{nom} + \varphi_t \approx 3 + 1 = 4 \text{ cm}$$

$$2.c \le t_{ef,\,i} \le \frac{A}{u} \qquad 2(3+1) = 8 \text{ cm} \le t_{ef,\,i} \le \frac{0,2592}{2,16}10^2 = 12 \text{ cm}$$

$\Rightarrow$ Prenons $t_{ef,\,i} = 9$ cm

$A_k = \left(b_w - t_{ef,\,i}\right).\left(h - t_{ef,\,i}\right)$ = aire du contour tracé à mi épaisseur des parois de la section creuse équivalente :

$$A_k = (0,36 - 0,09).(0,72 - 0,09) = 0,1701 \text{ m}^2$$

$$T_{Rd,\,max} = 2.0,54.1.16,7.0,09.0,1701\frac{\sqrt{2}}{2}.\frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$T_{Rd,\,max} = 0,138 \text{ mMN}$$

2.2. Effort tranchant de calcul maximal pouvant être supporté sans provoquer l'écrasement des bielles de béton comprimé : $V_{Rd,\,max}$

$\alpha = 90^\circ$ en adoptant des armatures d'âme droites.

$\nu_1 = 0,6\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$ (A_{sw} calculée pour f_{ywk}) : $\nu_1 = 0,6\left(1 - \frac{25}{250}\right) = 0,54$

$$\begin{cases} V_{Rd,\ max} = b_w.z.\nu_1.f_{cd}\ \dfrac{\cot g\theta + \cot g\alpha}{1+\cot g^2\theta} \\ z = 0,9.d \\ \nu_1 = \nu \end{cases}$$

$$V_{Rd,\ max} = 0,36.0,9.0,65.0,54.16,7\ \frac{1+0}{1+1^2} = 0,950\ MN$$

2.3. Vérification pour la sollicitation combiné torsion + effort tranchant

Pour une section pleine :

$$\left[\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,\ max}}\right] + \left[\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,\ max}}\right] >< 1 \qquad \boxed{\left[\frac{0,073}{0,138}\right] + \left[\frac{0,059}{0,950}\right] = 0,591 < 1 \text{ O.K.}}$$

3. Armatures longitudinales

3.1. Armatures longitudinales pour la flexion

$f_{ck} >< 50$ MPa $\Rightarrow \begin{cases} \lambda, \\ \eta \end{cases}$ $\qquad$ $f_{ck} = 25$ MPa < 50 MPa $\Rightarrow \begin{cases} \lambda = 0,8 \\ \eta = 1 \end{cases}$

$f_{cu} = \eta.\alpha_{cc}\ \dfrac{f_{ck}}{\gamma_c}$ $\qquad$ $f_{cu} = 1.1\dfrac{25}{1,5} = 16,7$ MPa

$f_{yd} = \dfrac{f_{yk}}{\gamma_s}$ $\qquad$ $f_{yd} = \dfrac{500}{1,15} = 435$ MPa

$\mu_{cu} = \dfrac{M_{Ed}}{b_w.d^2.f_{cu}}$ $\qquad$ $\mu_{cu} = \dfrac{0,0391}{0,36.0,65^2.16,7} = 0,015$

en utilisant le diagramme σ–ε parabole-rectangle :

béton $\Rightarrow$ ε_{cu2} $\qquad$ $f_{ck} = 25$ MPa < 50 MPa $\Rightarrow$ $\varepsilon_{cu2} = 3,5\ ‰$

armatures $\Rightarrow$ ε_{uk} $\qquad$ aciers classe B $\Rightarrow$ $\varepsilon_{uk} = 50\ ‰$

$\Rightarrow \quad \alpha = 1,25\left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{bu}}\right]$ $\qquad$ $\alpha_u = \dfrac{1}{0,8}\left[1 - \sqrt{1 - 2.0,015}\right] = 0,019$

- Classe de ductlité et f_{ck} $\Rightarrow \begin{cases} \alpha_{AB} \\ \mu_{AB} \end{cases}$

Aciers S 500 B et $f_{ck} = 25$ MPa $\Rightarrow \begin{cases} \alpha_{AB} = 0,0722 \\ \mu_{AB} = 0,0561 \end{cases}$

$\Rightarrow \quad \mu_{cu} >< \mu_{AB} \quad \Rightarrow$ Pivot $\qquad$ $\mu_{cu} = 0,015 < 0,0561 = \mu_{AB} \quad \Rightarrow$ Pivot A

$$\Rightarrow \quad \mu_{cu} >< \mu_{lu} \quad \mu_{cu} = 0,015 < 0,0561 = \mu_{AB} \leq \mu_{lu} \; \forall \; \gamma = \frac{M_u}{M_{ser}} \quad \Rightarrow \quad A_{s2} = 0$$

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{ud} = 0,9.\varepsilon_{uk} = 0,9\frac{50}{1\,000} = \frac{45}{1\,000}$$

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} \qquad \varepsilon_{yd} = \frac{435}{2.10^5} = \frac{2,175}{1\,000}$$

$$\varepsilon_{s1} >< \varepsilon_{yd} \qquad \varepsilon_{s1} = \frac{45}{1\,000} > \frac{2,175}{1\,000} = \varepsilon_{yd} \quad \Rightarrow \quad \text{palier du diagramme } \sigma\text{–}\varepsilon \text{ de l'acier}$$

$$\sigma_{s1} = 433,20 + 727,27.\varepsilon_s \not> 466 \text{ (MPa)}$$

$$\sigma_{s1} = 433,20 + 727.27.,45.10^{-3} = 466 \text{ MPa}$$

Remarque :

Nous avons bien, au pivot A : $\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{ud} \Rightarrow \sigma_{s1} = 466$ MPa pour des aciers de classe de ductilité B.

$$\Rightarrow \quad z_c = d\left[1 - \frac{\lambda}{2}\alpha_u\right] \qquad z_c = 0,65\left[1 - \frac{0,8}{2}0,019\right] = 0,645 \text{ m}$$

$$A_{s1} = \frac{M_{Ed}}{z_c.\sigma_{s1}} \qquad A_{s1} = \frac{0,0391}{0,645.466}10^4 = 1,30 \text{ cm}^2$$

$$f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad \Rightarrow \quad f_{ctm} = 0,3\left[f_{ck}\right]^{2/3} \quad f_{ctm} = 0,3\left[25\right]^{2/3} = 2,56 \text{ MPa}$$

$b_t = b_w$ = largeur minimale de la zone tendue : $b_t = b_w = 0,36$ m

- Maîtrise de la fissuration non requise :

$$f_{ct,\,eff} = f_{ctm,\,fl} = \text{Max}\begin{cases}\left(1,6 - \dfrac{h}{1\,000}\right)f_{ctm} \\ f_{ctm}\end{cases}$$

$$f_{ct,\,eff} = 2,56 \text{ MPa} = \text{Max}\begin{cases}\left(1,6 - \dfrac{720}{1\,000}\right)2,56 = 2,25 \text{ MPa} \\ 2,56 \text{ MPa}\end{cases}$$

$$A_{s,\,min} = \text{Max}\begin{cases}0,26\dfrac{f_{ct,\,eff}}{f_{yk}}b_t.d \\ 0,0013.b_t.d\end{cases}$$

$$A_{s,\,min} = 3{,}12\ cm^2 = Max\begin{cases} 0{,}26\dfrac{2{,}56}{500}0{,}36.0{,}65.10^4 = 3{,}12\ cm^2 \\ 0{,}0013.36.65 = 3{,}04\ cm^2 \end{cases}$$

$A_{sl} >< A_{s,\,min}$ $\qquad A_{sl} = 1{,}30\ cm^2 < 3{,}12\ cm^2 = A_{s,\,min}$

$\Rightarrow$ Retenu : $A_{sl} = 3{,}12\ cm^2$.

3.2. Armatures longitudinales pour la torsion

• Calcul :

$u_k = 2\left[\left(b_w - t_{ef,\,i}\right) + \left(h - t_{ef,\,i}\right)\right]$ = périmètre de A_k

$u_k = 2\left[(0{,}36 - 0{,}09) + (0{,}72 - 0{,}09)\right] = 1{,}80$ m

$\theta = 45^\circ$ = inclinaison des bielles

$$\sum A_{sl}.f_{yd} \geq \frac{T_{Ed}.u_k}{2.A_k}\cot g\theta \qquad \frac{\sum A_{sl}}{u_k} \geq \frac{0{,}073}{2.0{,}1701.435}1.10^2 = \frac{1}{20{,}27}\ cm^2/cm$$

$$\sum A_{sl} = \frac{180}{20{,}27} = 8{,}88\ cm^2$$

• Choix des barres : $\Rightarrow$ Compte tenu des aciers de flexion :

Aciers supérieurs :

$$A_{s,\,sup} = 3{,}12 + \frac{8{,}88}{2} = 7{,}56\ cm^2$$

$\Rightarrow$ 2 ϕ 20 HA + 1 ϕ 16 HA

$A_{sl} = 2.3{,}14 + 2{,}01 = 8{,}29\ cm^2$

Aciers inférieurs et intermédiaires :

$$A_{s,\,inf} = \frac{8{,}88}{2} = 4{,}44\ cm^2$$

$\Rightarrow$ 5 ϕ 12 HA dont 3 inférieurs pour vérifier en travée (voir les espacements le long du côte h = 72 cm ci-après) :

$A_{s,\,inf} = A_{s,\,min} = 3{,}12\ cm^2$

$A_{s2} = 5.1{,}13 = 5{,}65\ cm^2$

Vérification en travée pour les aciers inférieurs :

$\Rightarrow$ En travée : $M_{Ed} = \dfrac{p.l_n^2}{24} = \dfrac{M_{Ed,\,app}}{2}$ et

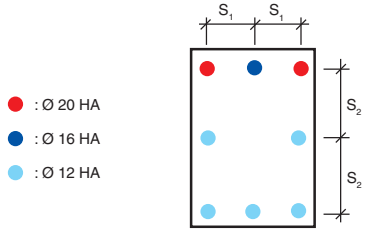
$T_{Ed} = 0$

$$A_{s,\,inf} = A_{s2} = A_{s,\,min} = 3{,}12\ cm^2$$

- Espacement des barres longitudinales :
  - au moins une barre dans chaque angle,
  - $s \leq 350$ mm

En prenant $\phi_t = 8$ mm

$$\left(\phi_t \approx \frac{\phi_{l\max}}{3} = \frac{20}{3} = 6{,}7\ mm\right)$$



$$s_1 = \frac{36 - 2\left(3 + 0{,}8 + \frac{2}{2}\right)}{2} = 13{,}2\ cm < 35\ cm\ O.K.$$

$$s_2 = \frac{72 - 2.3 - 2.0{,}8 - \frac{2}{2} - \frac{1{,}2}{2}}{2} = 31{,}4\ cm < 35\ cm\ O.K.$$

$$\Rightarrow \quad \mathbf{2\,\phi\,20\ HA + 1\,\phi\,16\ HA + 5\,\phi\,12\ HA}$$

4. Armatures transversales

4.1. Armatures d'âme pour l'effort tranchant

- Nécessité de mettre des armatures d'effort tranchant
- Effort tranchant résistant de calcul de l'élément sans armatures d'âme : $V_{rd,\,c}$

$f_{ctk,\,0,05} = 0{,}7.f_{ctm}$ $\qquad$ $f_{ctk,\,0,05} = 0{,}7.2{,}56 = 1{,}79$ MPa

$$f_{ctd} = \alpha_{ct}\frac{f_{ctk,\,0,05}}{\gamma_c} \qquad f_{ctd} = 1\frac{1{,}79}{1{,}5} = 1{,}19\ MPa$$

A_{sl} = aire de l'armature longitudinale dans la section distante de $d + l_{bd}$ de celle étudiée :

$$A_{sl} = A_{s1} + A_{s2} = 8{,}29 + 5{,}65 = 13{,}94\ cm^2$$

(*cf.* § 3.2.).

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w.d} \not> 2\,\% \qquad \rho_l = \frac{13{,}94}{36.72} = 0{,}005 < 2\,\%$$

N_{Ed} = effort normal $\qquad$ $N_{Ed} = 0$ (flexion simple)

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} \qquad \sigma_{cp} = 0$$

$$V_{Rd,\,c} = \text{Max}\begin{cases}\left[C_{Rd,\,c}.k.\sqrt[3]{100.\rho_l.f_{ck}} + k_1.\sigma_{cp}\right]b_w.d = V_{Rd,\,c1}\\ \left[v_{min} + k_1.\sigma_{cp}\right]b_w.d = V_{Rd,\,c2}\end{cases}$$

avec :

$$C_{Rd,\,c} = \frac{0{,}18}{\gamma_c} \qquad C_{Rd,\,c} = \frac{0{,}18}{1{,}5} = 0{,}12$$

$$k = \text{Min}\begin{cases}1 + \sqrt{\frac{200\text{ mm}}{d}}\\ 2\end{cases} \qquad k = 1{,}55 = \text{Min}\begin{cases}1 + \sqrt{\frac{200}{650}} = 1{,}55\\ 2\end{cases}$$

$$k_1 = 0{,}15 \qquad k_1 = 0{,}15$$

$$v_{min} = 0{,}035.k^{3/2}.\sqrt{f_{ck}} \qquad v_{min} = 0{,}035.1{,}55^{3/2}.\sqrt{25} = 0{,}338$$

$$V_{Rd,\,c1} = \left[0{,}12.1{,}55\sqrt[3]{100\frac{5}{1\,000}25} + 0{,}15.0\right]0{,}36.0{,}65 = 0{,}101\text{ MN}$$

$$V_{Rd,\,c2} = (0{,}338 + 0{,}15.0)\,0{,}36.0{,}65 = 0{,}079\text{ MN}$$

Vérification :

$V_{Ed0} >< V_{Rd,\,c1}$ $\qquad V_{Ed0} = 0{,}040\text{ MN} < 0{,}101\text{ MN} = V_{Rd,\,c1}$

$V_{Ed0} >< V_{Rd,\,c2}$ $\qquad V_{Ed0} = 0{,}040\text{ MN} < 0{,}079\text{ MN} = V_{Rd,\,c2}$

$\Rightarrow$ AMATURES D'EFFORT TRANCHANT CALCULÉES NON NÉCESSAIRES

Armatures d'âme calculées : bien qu'il ne soit pas nécessaire de prévoir des armatures d'âme, nous ferons le calcul de celles-ci pour illustrer le cas où il y a combinaison des deux systèmes d'armatures transversales (d'effort tranchant et de torsion).

α = inclinaison des A_{sw} $\qquad A_{sw}$ droites $\Rightarrow$ $\alpha = 90^\circ$

$$f_{ywd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \qquad f_{ywd} = \frac{500}{1{,}15} = 435\text{ MPa}$$

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{V_{Ed}}{0{,}9.d.f_{ywd}(\text{cotg}\theta + \text{cotg}\alpha)\,\sin\alpha}$$

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{0{,}059}{0{,}9.0{,}65.435.(1+0)1}10^2 = \frac{1}{43{,}13}\text{ cm}^2/\text{cm}$$

• Armatures d'âme maximales :

$$\nu_1 = 0,6\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \qquad \nu_1 = 0,6\left(1 - \frac{25}{250}\right) = 0,54$$

$$\frac{A_{sw}.f_{ywd}}{b_w.s} \le \frac{\frac{1}{2}\nu_1.f_{cd}.\sin\alpha}{1 - \cos\alpha} \qquad \frac{A_{sw}}{s} \le \frac{\frac{1}{2}0,54.16,7.1}{435(1-0)}36 = \frac{1}{2,68}\ cm^2/cm$$

$$\boxed{\frac{A_{sw}}{s} = \frac{1}{43,13} < \frac{1}{2,68}\ cm^2/cm\ O.K.}$$

Remarque

A_{sw} = section d'une nappe d'armatures transversales située dans la largeur b_w de la section droite.

• Pourcentage minimal :

voir § 4.5 pour l'ensemble des armatures transversales.

• Espacement maximal :

voir § 4.3 pour l'ensemble des armatures transversales.

4.2. Armatures transversales pour la torsion

• Calcul :

$$\frac{A_{sw}}{s} f_{ywd} \ge \frac{T_{Ed}}{2.A_k.\cot g\theta} \qquad \frac{A_{sw}}{s} \ge \frac{0,073}{2.0,1701.1.435}10^2 = \frac{1}{20,27}\ cm^2/cm$$

Remarque

A_{sw} = section d'un brin d'armatures transversales située dans l'épaisseur $t_{ef,\,i}$ de la paroi fictive.

• Pourcentage minimal :

voir § 4.5 pour l'ensemble des armatures transversales.

• Espacement maximal :

voir § 4.3 pour l'ensemble des armatures transversales.

4.3. Ensemble des armatures transversales

• Tracé des armatures :

Le cumul des deux systèmes d'armatures transversales donne dans l'épaisseur $t_{ef,\,i}$ de la paroi fictive :

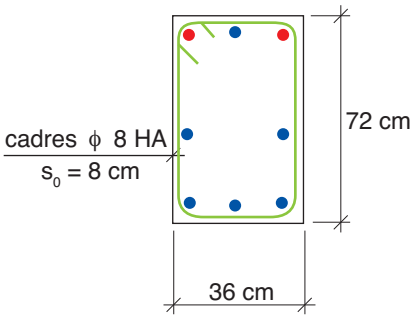
$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{A_{swV}}{s_V} + \frac{A_{swT}}{s_T} \qquad \frac{A_{sw}}{s} = \frac{1}{2}.\frac{1}{43,13} + \frac{1}{20,27} = \frac{1}{16,41}\ cm^2/cm$$

où : $\frac{A_{swV}}{s_V} = \frac{1}{2}.\frac{A_{sw}}{s}$ dans l'épaisseur d'une paroi fictive

$\Rightarrow$ **1 brin ϕ 8 HA (cadre)**

$\mathbf{s_0} = 0{,}5.16{,}41 = \mathbf{8{,}2\ cm}$

d'où la coupe sur appui :



- Espacement :

$u = 2\left[b_w + h\right]$ = périmètre extérieur de la section : $u = 2\left[0{,}36 + 0{,}72\right] = 2{,}16$ m

$$s \le s_{l,\,max} = \text{Min}\begin{cases} 0{,}75.d\left(1 + \text{cotg}\alpha\right) \\ \dfrac{u}{8} \\ \text{plus petite dimension de la section droite} \end{cases}$$

$$s \le 27\ \text{cm} = \text{Min}\begin{cases} 0{,}75.65(1+0) = 48{,}7\ \text{cm} \\ \dfrac{216}{8} = 27\ \text{cm} \\ 36\ \text{cm} \end{cases}$$

4.4. Inclinaison réelle des bielles

$$\text{tg}^2\theta = \frac{A_{sw}}{\sum A_{sl}} . \frac{u_k}{s} . \frac{f_{ywd}}{f_{yd}} \qquad \text{tg}^2\theta = \frac{1.0{,}5}{2{,}01 + 2.3{,}14 + 5.1{,}13} . \frac{1{,}80}{0{,}08} . \frac{435}{435} = 0{,}807$$

$$\Rightarrow \quad \text{tg}\theta = 0{,}898 \quad \Rightarrow \theta = 41{,}93°$$

$\text{tg}\theta \in \left[1\,;\,2{,}5\right]$? $\qquad$ $\boxed{1 \approx \text{tg}\theta = 0{,}898 < 2{,}5 \text{ O.K.}}$

4.5 Pourcentage minimal d'armatures transversales

Pour l'ensemble des armatures transversales :

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s.b_w.\sin\alpha} \ge 0{,}08\frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}$$

$$\alpha = 90° \quad \Rightarrow \quad \frac{A_{sw}}{s} \geq 0,08 \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} b_w = 0,08 \frac{\sqrt{25}}{500} 36 = \frac{1}{34,72} \text{ cm}^2 / \text{cm}$$

$$\boxed{\frac{A_{sw}}{s} = \frac{1}{16,41} \text{ cm}^2 / \text{cm} > \frac{1}{34,72} \text{ cm}^2 / \text{cm O.K.}}$$

4.6. Répartition des armatures transversales

- Distance du nu d'appui à la section où l'effort tranchant et le couple de torsion s'annulent :

$l_0 = \frac{l_n}{2}$ $\qquad$ $l_0 = \frac{4,00}{2} = 2,00$ m

- Compte tenu du fait que le diagramme du moment de torsion est identique au diagramme de l'effort tranchant d'une poutre encastrée aux deux extrémités et uniformément chargée, on appliquera la méthode Caquot. Ici, il n'y a pas de transmission directe de charges aux appuis.

$l'_0 = l_0$ $\qquad$ $l'_0 = 2,00$ m

- Nombre théorique de répétitions :

$n_i = l'_0$ $\qquad$ $n_i = 2$

s_0 $\qquad$ $s_0 = 8$ cm

- Répartition :

espacements (cm)	$\frac{s_0}{2}$	8	9	10	11	13	16	20	25
nombre théorique de répétitions		2	2	2	2	2	2	2	2
nombre cumulé		2	4	6	8	10	12	14	16
nombre arrondi		2	4	6	8	10	12	14	16
nombre de répétitions		2	2	2	2	2	2	2	$0,9 = \frac{200 - 178}{25}$
x (cm)	4	20	38	58	80	106	138	178	

$\Rightarrow$ restent à mi-portée : 200 – 178 = 22 cm

$\Rightarrow$ $\boxed{4 + 2.8 + 2.9 + 2.10 + 2.11 + 2.13 + 2.16 + 2.20 + 22}$

avec un cours d'A_{sw} à mi-portée.

en vérifiant à mi-travée :

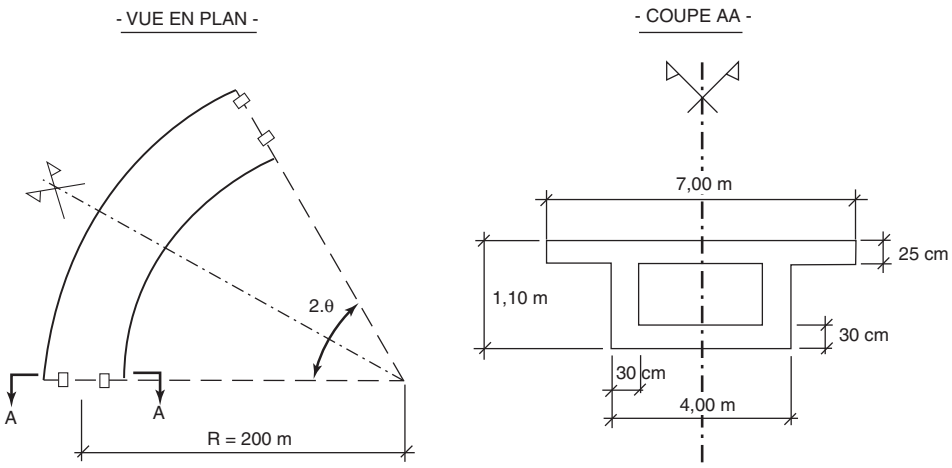
$s = 22 \text{ cm} < 27 \text{ cm} = s_{l,\,max}$ O.K.

Remarque

Dans le tableau de répartition, pour s = 25 cm, le nombre de répétitions 2 ne convient pas car il ne permet pas d'atteindre le milieu de la portée avec des espacements de 25 cm.

Application n° 2 : torsion dans un tablier de pont courbe

–Enoncé–



On considère le pont courbe représenté ci-dessus (vue en plan et coupe du tablier).

- Sollicitations dans la section sur appui :
- V_{Ed} = 1,720 MN,
- T_{Ed} = 0,290 mMN,

obtenues pour une charge uniformément répartie :

p_u = 0,189 MN/m.

- Matériaux :
- béton : f_{ck} = 30 MPa,
- aciers : S 500.
- Hauteur utile de la section : d = 1,00 m. Armatures longitudinales dans la section distante de d + l_{bd} de l'appui : A_{sl} = 30,00 cm^2.
- Distance du centre de gravité des armatures longitudinales au parement de béton : 4 cm.

• On se propose, en considérant que la résistance à la torsion des deux parties de la section droite en consoles est négligeable :

1/ de vérifier la compression des bielles de béton,
2/ de déterminer les armatures transversales,
3/ de calculer les armatures longitudinales pour la torsion.

–Corrigé–

1. Vérification de la compression des bielles de béton

1.1. Couple de torsion résistant de calcul : $T_{Rd,\ max}$

$$T_{Rd,\ max} = 2.\nu.\alpha_{cw}.f_{cd}.t_{ef,\ i}.A_k.\sin\theta.\cos\theta$$

avec :

$$\nu = 0,6\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \qquad \nu = 0,6\left(1 - \frac{30}{250}\right) = 0,528$$

$$\alpha_{cw} = 1$$

$$f_{cd} = \alpha_{cc}\frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (\alpha_{cc} = 1) \qquad f_{cd} = 1\frac{30}{1,5} = 20\ \text{MPa}$$

$1 \leq \text{cotg}\theta \leq 2,5$

Prenons $\theta = 45^\circ$ pour les bielles de béton comprimé $\Rightarrow$ $\text{cotg}\theta = 1$

$A = b_w.h$ = surface totale de la section (les parties en console de celle-ci n'interviennent pas dans la résistance à la torsion) :

$$A = 4,00.1,10 = 4,40\ \text{m}^2$$

u = périmètre extérieur de la section : $u = 2(4,00 + 1,10) = 10,20\ \text{m}$

$t_{ef,\ i} = t_{min}$ $\qquad t_{ef,\ i} = 25\ \text{cm}$

$A_k = \left(b_w - t_{ef,\ i}\right).\left(h - t_{ef,\ i}\right)$ = aire du contour tracé à mi épaisseur des parois de la section creuse équivalente :

$$A_k = (4,00 - 0,30).\left(1,10 - \frac{0,25 + 0,30}{2}\right) = 3,053\ \text{m}^2$$

$$T_{Rd,\ max} = 2.0,528.1.20.0,25.3,053\frac{\sqrt{2}}{2}.\frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$T_{Rd,\ max} = 8,058\ \text{mMN}$$

1.2. Effort tranchant de calcul maximal pouvant être supporté sans provoquer l'écrasement des bielles de béton comprimé : $V_{Rd,\ max}$

$\alpha = 90^\circ$ en adoptant des armatures d'âme droites.

$\nu_1 = 0,6\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$ (A_{sw} calculée pour f_{ywk}) : $\nu_1 = 0,6\left(1 - \frac{30}{250}\right) = 0,528$

$$\begin{cases} V_{Rd,\ max} = b_w.z.\nu_1.f_{cd}\ \dfrac{\cot g\theta + \cot g\alpha}{1 + \cot g^2\theta} \\ z = 0,9.d \\ b_w = 2.t_{ef,\ i} : \text{âmes seules} \\ \nu_1 = \nu \end{cases}$$

$$V_{Rd,\ max} = (2.0,30).0,9.1,00.0,528.20\ \frac{1+0}{1+1^2} = 2,851\ \text{MN}$$

1.3. Vérification pour la sollicitation combinée torsion + effort tranchant

Pour une section pleine ou creuse :

$$\left[\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,\ max}}\right] + \left[\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,\ max}}\right] >< 1 \qquad \boxed{\left[\frac{0,290}{8,058}\right] + \left[\frac{1,720}{2,851}\right] = 0,639 < 1\ \text{O.K.}}$$

2. Armatures transversales

2.1. Armatures d'âme pour l'effort tranchant

- Nécessité de mettre des armatures d'effort tranchant

Remarque préliminaire :

Seules les deux âmes verticales de la section droite résistant à l'effort tranchant, nous prendrons pour les calculs relatifs à cette sollicitation :

$b_w = 2.t_{ef,\ i}$ $\qquad$ $b_w = 2.0,30 = 60$ cm

Effort tranchant résistant de calcul de l'élément sans armatures d'âme : $V_{Rd,\ c}$

$f_{ck} \leq 50$ MPa $\Rightarrow$ $f_{ctm} = 0,3\left[f_{ck}\right]^{2/3}$ $\quad f_{ctm} = 0,3\left[30\right]^{2/3} = 2,90$ MPa

$f_{ctk,\ 0,05} = 0,7.f_{ctm}$ $\qquad$ $f_{ctk,\ 0,05} = 0,7.2,90 = 2,03$ MPa

$f_{ctd} = \alpha_{ct}\ \frac{f_{ctk,\ 0,05}}{\gamma_c}$ $\qquad$ $f_{ctd} = 1\ \frac{2,03}{1,5} = 1,35$ MPa

A_{sl} = aire de l'armature longitudinale dans la section distante de $d + l_{bd}$ de celle étudiée :

$$A_{sl} = 30{,}00 \text{ cm}^2$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w.d} \not> 2\ \% \qquad \rho_l = \frac{30{,}00}{60.100} = 0{,}005 < 2\ \%$$

N_{Ed} = effort normal $\qquad N_{Ed} = 0$ (flexion simple)

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} \qquad \sigma_{cp} = 0$$

$$V_{Rd,\,c} = \text{Max}\begin{cases}\left[C_{Rd,\,c}.k.\sqrt[3]{100.\rho_l.f_{ck}} + k_1.\sigma_{cp}\right] b_w.d = V_{Rd,\,c1} \\ \left[v_{min} + k_1.\sigma_{cp}\right] b_w.d = V_{Rd,\,c2}\end{cases}$$

avec :

$$C_{Rd,\,c} = \frac{0{,}18}{\gamma_c} \qquad C_{Rd,\,c} = \frac{0{,}18}{1{,}5} = 0{,}12$$

$$k = \text{Min}\begin{cases}1 + \sqrt{\dfrac{200\text{ mm}}{d}} \\ 2\end{cases} \qquad k = 1{,}44 = \text{Min}\begin{cases}1 + \sqrt{\dfrac{200}{1\,000}} = 1{,}44 \\ 2\end{cases}$$

$k_1 = 0{,}15 \qquad k_1 = 0{,}15$

$$v_{min} = 0{,}035.k^{3/2}.\sqrt{f_{ck}} \qquad v_{min} = 0{,}035.1{,}44^{3/2}.\sqrt{30} = 0{,}331$$

$$V_{Rd,\,c1} = \left[0{,}12.1{,}44\sqrt[3]{100\frac{5}{1\,000}30} + 0{,}15.0\right] 0{,}60.1{,}00 = 0{,}256 \text{ MN}$$

$$V_{Rd,\,c2} = (0{,}331 + 0{,}15.0)\,0{,}60.1{,}00 = 0{,}199 \text{ MN}$$

• Vérification :

Charges permanentes uniquement (donc prépondérantes) ⇒ réduction pour transmission directe des charges aux appuis :

$V_{Ed0} = V_{Ed} - p_u.d \qquad V_{Ed0} = 1{,}72 - 0{,}189.1{,}00 = 1{,}531$ MN

$V_{Ed0} >< V_{Rd,\,c1} \qquad V_{Ed0} = 1{,}531 \text{ MN} > 0{,}256 \text{ MN} = V_{Rd,\,c1}$

$V_{Ed0} >< V_{Rd,\,c2} \qquad V_{Ed0} = 1{,}531 \text{ MN} > 0{,}199 \text{ MN} = V_{Rd,\,c2}$

⇒ Armatures d'effort tranchant calculées necessaires.

• Armatures d'âme calculées :

α = inclinaison des A_{sw} $\qquad$ A_{sw} droites $\Rightarrow$ $\alpha = 90^\circ$

$$f_{ywd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \qquad f_{ywd} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ MPa}$$

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{V_{Ed0}}{0,9.d.f_{ywd}\left(\text{cotg}\theta + \text{cotg}\alpha\right)\sin\alpha}$$

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{1,531}{0,9.1,00.435.(1+0)1}10^2 = \frac{1}{2,56} \text{ cm}^2 / \text{cm}$$

• Armatures d'âme maximales :

$$\frac{A_{sw}.f_{ywd}}{b_w.s} \leq \frac{\frac{1}{2}\nu_1.f_{cd}.\sin\alpha}{1-\cos\alpha} \qquad \frac{A_{sw}}{s} \leq \frac{\frac{1}{2}0,528.20.1}{435(1-0)}60 = \frac{1}{1,37} \text{ cm}^2 / \text{cm}$$

$$\boxed{\frac{A_{sw}}{s} = \frac{1}{2,56} < \frac{1}{1,37} \text{ cm}^2 / \text{cm O.K.}}$$

Remarque

A_{sw}= section d'une nappe d'armatures transversales située dans la largeur totale $b_w = 2.t_{ef,\,i}$ de la section droite.

• Pourcentage minimal :

voir § 2.4 pour l'ensemble des armatures transversales.

• Espacement maximal :

voir § 2.3 pour l'ensemble des armatures transversales.

2.2 Armatures transversales pour la torsion

• Calcul :

$$\frac{A_{sw}}{s} f_{ywd} \geq \frac{T_{Ed}}{2.A_k.\text{cotg}\theta} \qquad \frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{0,290}{2.3,053.1.435}10^2 = \frac{1}{91,59} \text{ cm}^2 / \text{cm}$$

Remarque

A_{sw} = section d'un brin d'armatures transversales située dans l'épaisseur $t_{ef,\,i}$ d'une seule paroi fictive.

• Pourcentage minimal :

voir § 2.4 pour l'ensemble des armatures transversales.

• Espacement maximal :

voir § 2.3 pour l'ensemble des armatures transversales.

2.3 Ensemble des armatures transversales

• Tracé dets armatures :

Le cumul des deux systèmes d'armatures transversales donne dans l'épaisseur $t_{ef,\,i}$ de la paroi fictive :

– dans les âmes :

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{A_{swV}}{s_V} + \frac{A_{swT}}{s_T}$$

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{1}{2}.\frac{1}{2,56} + \frac{1}{91,59} = \frac{1}{4,84}\ \text{cm}^2\ /\ \text{cm/âme}$$

où : $\frac{A_{swV}}{s_V} = \frac{1}{2}.\frac{A_{sw}}{s}$ pour chaque âme

$\Rightarrow$ 1 cadre ϕ 12 HA dans chaque âme :

$s_0 = 2.1,13.4,84 = 10,94$ cm

– dans les hourdis :

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{A_{swT}}{s_T}$$

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{1}{91,59}\ \text{cm}^2\ /\ \text{cm/hourdis}$$

$\Rightarrow$ 1 cadre ϕ 12 HA dans chaque hourdis :

$s_0 = 2.1,13.91,59 = 206,99$ cm

• Espacement :

$u = 2\left[b_w + h\right]$ = périmètre extérieur de la section :

$$u = 2\left[4,00 + 1,10\right] = 10,20\ \text{m}$$

$$s \le s_{l,\,max} = \text{Min}\begin{cases} 0,75.d\left(1 + \text{cotg}\alpha\right) \\ \dfrac{u}{8} \\ \text{plus petite dimension de la section droite} \end{cases}$$

$$s \le 75\ \text{cm} = \text{Min}\begin{cases} 0,75.100\left(1 + 0\right) = 75\ \text{cm} \\ \dfrac{1\,020}{8} = 127,5\ \text{cm} \\ 110\ \text{cm} \end{cases}$$

$\Rightarrow$ pour chaque âme :
1 cadre ϕ 12 HA

$s_0 = 10$ cm

$\Rightarrow$ pour chaque hourdis :
1 cadre ϕ 12 HA

$s_0 = 75$ cm

2.4 Pourcentage minimal d'armatures transversales

• Pour les âmes :

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s.b_w.\sin\alpha} \geq 0,08\frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \text{ avec : } b_w = 2.t_{ef,\,i}$$

$$\alpha = 90° \Rightarrow \frac{A_{sw}}{s} \geq 0,08\,\frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}b_w = 0,08\,\frac{\sqrt{30}}{500}(2.30) = \frac{1}{19,02}\text{cm}^2/\text{cm}$$

$$\boxed{\frac{A_{sw}}{s} = \frac{1}{4,84}\text{ cm}^2/\text{cm} > \frac{1}{19,02}\text{ cm}^2/\text{cm}\ \text{O.K.}}$$

• Pour les hourdis :

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s.b_w.\sin\alpha} \geq 0,08\frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \text{ avec } b_w = t_{ef,\,i}$$

Compte tenu de la différence d'épaisseur des deux hourdis, la section d'aciers transversaux la plus grande est obtenue pour l'épaisseur maximale.

$$\alpha = 90° \Rightarrow \frac{A_{sw}}{s} \geq 0,08\frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}t_{ef,\,i} = 0,08\frac{\sqrt{30}}{500}30 = \frac{1}{38,04}\text{ cm}^2/\text{cm}$$

$$\boxed{\frac{A_{sw}}{s} = \frac{1}{91,59}\text{ cm}^2/\text{cm} < \frac{1}{38,04}\text{ cm}^2/\text{cm}}$$

$$\Rightarrow \frac{A_{sw}}{s} = \frac{1}{38,04}\text{ cm}^2/\text{cm}$$

$\Rightarrow$ 1 cadre ϕ 12 HA dans chaque hourdis :

$s_0 = 2.1,13.38,04 = 85,97$ cm

$s_0 >< s_{l,\,max}$

$s_0 = 85$ cm > 75 cm $= s_{l,\,max}$

$\Rightarrow$ **1 cadre ϕ 12 HA dans chaque hourdis :**

$s_0 = 75$ cm

3. Armatures longitudinales

3.1 Armatures longitudinales pour la torsion

• Calcul :

$u_k = 2\left[\left(b_w - t_{ef,\,i}\right) + \left(h - t_{ef,\,i}\right)\right]$ = périmètre de A_k

$$u_k = 2\left[(4{,}00 - 0{,}30) + \left(1{,}10 - \frac{0{,}30 + 0{,}25}{2}\right)\right] = 9{,}05 \text{ m}$$

$\theta = 45^\circ$ = inclinaison des bielles

$$\sum A_{sl}.f_{yd} \geq \frac{T_{Ed}.u_k}{2.A_k}\cot g\theta \qquad \frac{\sum A_{sl}}{u_k} \geq \frac{0{,}290}{2.3{,}053.435}1.10^2 = \frac{1}{91{,}59} \text{ cm}^2 / \text{cm}$$

$$\sum A_{sl} = \frac{905}{91{,}59} = 9{,}88 \text{ cm}^2$$

soit en répartissant ces armatures sur le pourtour de la section :

$$\frac{9{,}88}{2\left[(4{,}00 - 2.0{,}04) + (1{,}10 - 2.0{,}04)\right]} = 1{,}02 \text{ cm}^2 / \text{cm}$$

$\Rightarrow$ **4 ϕ 6 HA/pm**

$A_{sl} = 4.0{,}28 = 1{,}12 \text{ cm}^2 / \text{m}$

• Espacement des barres longitudinales :
  – au moins une barre dans chaque angle,
  – $s \leq 350$ mm

$$\boxed{s = \frac{100}{4} = 25 \text{ m} < 35 \text{ cm O.K.}}$$

Remarque

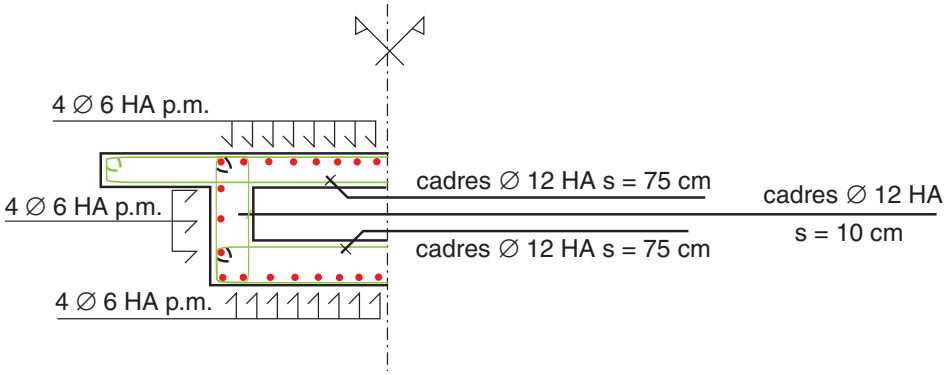
comme nous avons choisi $\theta = 45°$, il en résulte que $\cot g\theta = tg\theta$ et :

$$\frac{\sum A_{sl}}{u_k}.f_{yd} = \frac{A_{sw}}{s}.f_{ywd} = \frac{T_{Ed}}{2.A_k}$$

3.2 Armatures longitudinales pour la flexion

Pour mémoire : sur appuis, il faut rajouter aux armatures longitudinales déterminées précédemment, les aciers inférieurs de flexion prolongés sur appuis.

4. Schéma des aciers de torsion



10 Épures de répartition des armatures longitudinales et des armatures d'âme

I. RAPPELS THÉORIQUES

1. Introduction

En pratique :

- on trace les courbes enveloppes du moment fléchissant M et de l'effort tranchant V ;
- on détermine les armatures longitudinales nécessaires dans les sections de moments extrêmes (en travée et sur appuis) ;
- on calcule les armatures d'âme correspondant aux efforts tranchants en certaines sections (au voisinage des appuis et de part et d'autre des points d'application des charges concentrées).

On proportionne ensuite, en chaque section de la poutre, les armatures longitudinales et les armatures d'âme aux efforts qui s'y développent en utilisant des épures de répartition.

2. Répartition des armatures longitudinales

2.1 Moment maximal admissible d'un groupe de barres longitudinales

C'est le moment maximal que peut équilibrer un groupe de i barres tendues :

- de section totale $A_{si} = \sum_{k=1}^{i} A_{sk}$;
- pour une hauteur utile d_i.

Deux cas peuvent se présenter.

2.1.1 État limite ultime

On suppose que la valeur du bras de levier z_c trouvée lors du calcul de la section d'armatures équilibrant le moment maximal (sur appui ou en travée) est constante sur la longueur de la poutre (cette simplification va dans le sens de la sécurité).

Dans le cas du diagramme contraintes-déformations de l'acier à palier incliné, on suppose que la valeur de la contrainte des armatures tendues est égale à f_{yd} (valeur inférieure à la contrainte σ_{s1} utilisée pour le calcul de la section d'armatures équilibrant le moment maximal sur appui ou en travée) et qu'elle est constante sur la longueur de la poutre (cette simplification va dans le sens de la sécurité).

On a donc :

$\begin{cases} \overline{M_{ui}} = A_{si}.f_{yd}.z_0 \\ z_0 \text{ valeur utilisée pour le calcul de } A_{smax} \text{ dans la section de moment extrême considérée (en travée ou sur appui).} \end{cases}$

Dans le cas de plusieurs groupes de barres :

$$\overline{M_u} = \sum_i \overline{M_{ui}}$$

2.1.2 État limite de service par limitation des contraintes

De même que pour l'état limite ultime :

$\begin{cases} \overline{M_{seri}} = A_{si}.\overline{\sigma_s}.\overline{z_{c1}} \\ z_{c1} = d_i\left(1 - \dfrac{\overline{\alpha_1}}{3}\right) \text{ valeur utilisée pour le calcul de } A_{smax} \text{ dans la section de moment extrême considérée (en travée ou sur appui).} \end{cases}$

Dans le cas de plusieurs groupes de barres :

$$\overline{M_{ser}} = \sum_i \overline{M_{seri}}$$

2.2 Arrêt des barres

Lorsque l'on arrête dans une même section les i barres d'un groupe (supposées de même diamètre), leur moment maximal admissible décroît linéairement de $\overline{M_i}$ ($\overline{M_{ui}}$ ou $\overline{M_{seri}}$) à 0 sur la longueur d'ancrage de ces barres.

Il suffit de remarquer que :
1/ $\overline{M_i} = A_{si}.\sigma_s.z_c$ est, pour A_{si} et z_c constants, proportionnel à σ_s,
2/ σ_s varie linéairement de 0 à sa valeur maximale sur la longueur d'ancrage ℓ_a (voir remarque au § 3.5 du chapitre 4 : « Dispositions constructives »).

On a :

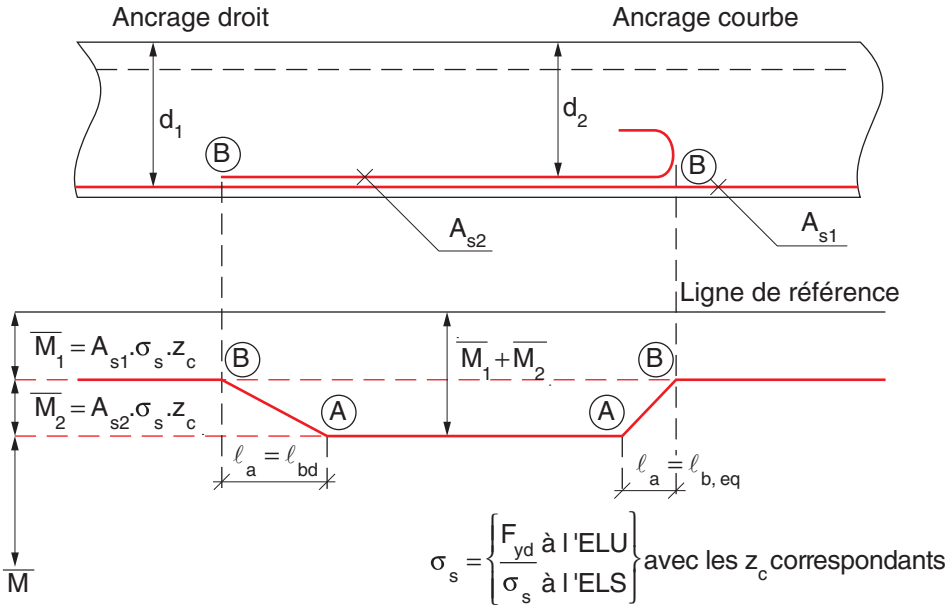
$\ell_a = \ell_{bd}$ pour les ancrages droits,

$\ell_a = \ell_{b,\,eq}$ pour les ancrages courbes.

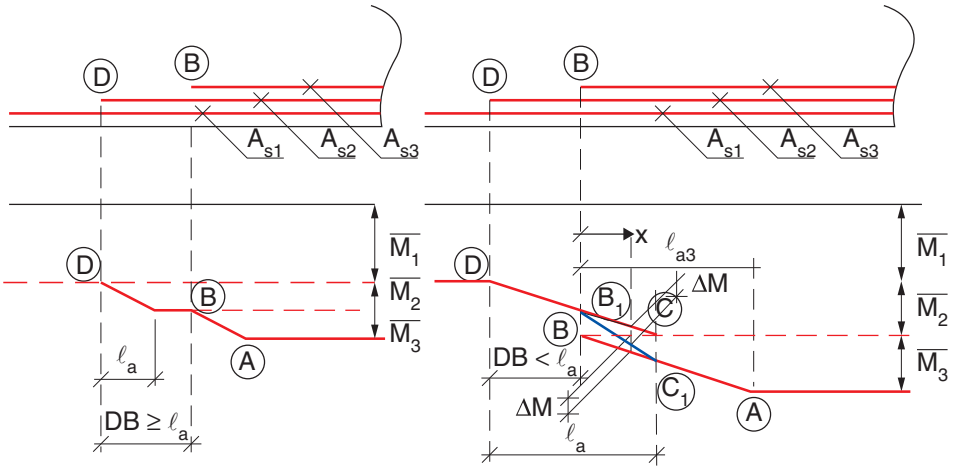
2.3 Diagramme des moments admissibles

Dans une poutre de hauteur constante, le diagramme du moment admissible d'un groupe de barres arrêtées se compose donc :

- d'un segment de droite parallèle à l'axe de la poutre ;
- de deux segments inclinés, aux extrémités du groupe de barres, de longueur l_a en projection sur l'axe de la poutre.



Pour deux groupes de barres arrêtées successivement en B et D en partant du point de moment extrême, le diagramme des moments admissibles peut être de l'un des deux types I ou II ci-dessous suivant que la distance DB est supérieure ou inférieure à la longueur d'ancrage ℓ_a du groupe de barres arrêtées en D :



DB ≥ ℓ_a
Diagramme de type I

DB < ℓ_a
Diagramme de type II

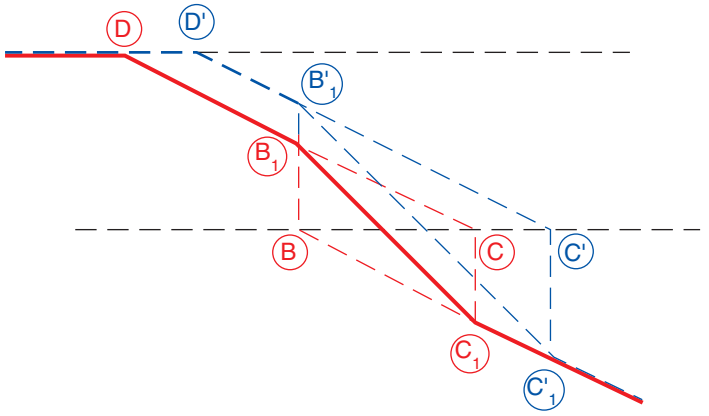
Pour le segment C_1B_1, il suffit de remarquer que la part de moment admissible des barres A_{s3} à rajouter au moment admissible des barres A_{s2} vaut :

$$\Delta M = \overline{M_3}\frac{x}{\ell_{a3}}$$

cette quantité variant linéairement en fonction de l'abscisse x depuis le point B_1.

Propriété importante pour les diagrammes du type II :

Si B étant fixe, D se rapproche de B, la droite B_1C_1 se déplace parallèlement à elle-même (triangles semblables multiples dont B est centre de similitude).



2.4 Règle du décalage

Par suite de la fissuration oblique, l'effort de traction supporté par une armature dans une section A d'abscisse x correspond au moment dans une section B d'abscisse $x + a_l$ (voir § 2.1.5 du chapitre 8 : « Effort tranchant »).

Le décalage a_l varie de z (treillis simple) à $\frac{z}{2}$ (treillis multiple de Mörsch).

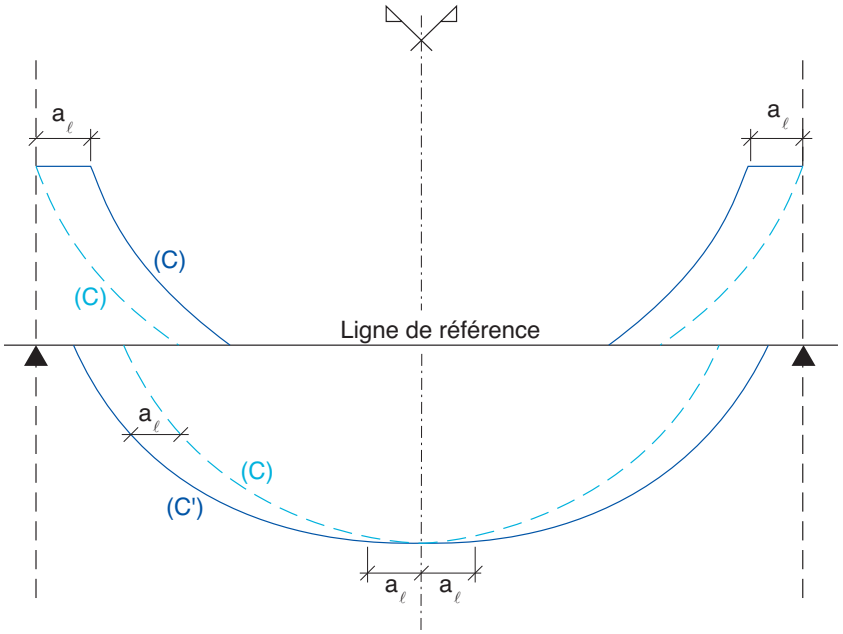
Pour les éléments où aucune armature d'effort tranchant n'est requise, on adopte[1] (voir § 3.2.3 du chapitre 8 : « Effort tranchant ») :

$$\boxed{a_l = d}$$

Pour les éléments avec armatures d'effort tranchant, on adopte[2] (voir § 4.4.6 du chapitre 8 : « Effort tranchant ») :

$$\boxed{a_l = z\,\frac{\cot g\theta - \cot g\alpha}{2} \geqslant 0} \quad \text{où } z = 0{,}9.d \qquad \textbf{(9.2)}$$

Il en résulte que le diagramme des moments admissibles des armatures longitudinales d'une travée doit envelopper, non pas la courbe enveloppe des moments (C), mais la courbe (C') obtenue en décalant de a_l tous les points de (C) parallèlement à l'axe de la poutre dans le sens le plus défavorable.



1. EC 2 – 6.2.2 (5)
2. EC 2 – 9.2.1.3 (2)

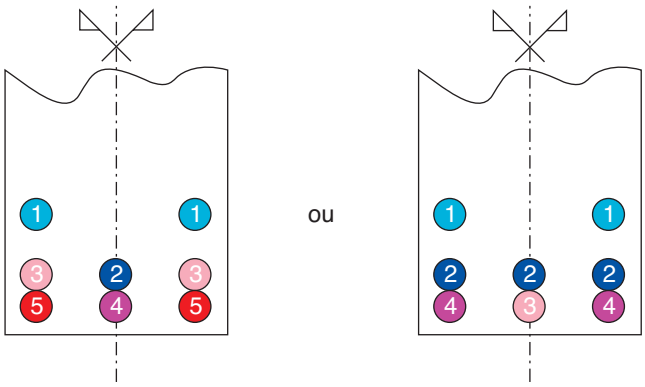
2.5 Épure d'arrêt des armatures longitudinales

2.5.1 Principes

Arrêter toujours les armatures par groupes symétriques par rapport au plan moyen.

Pour les armatures inférieures :

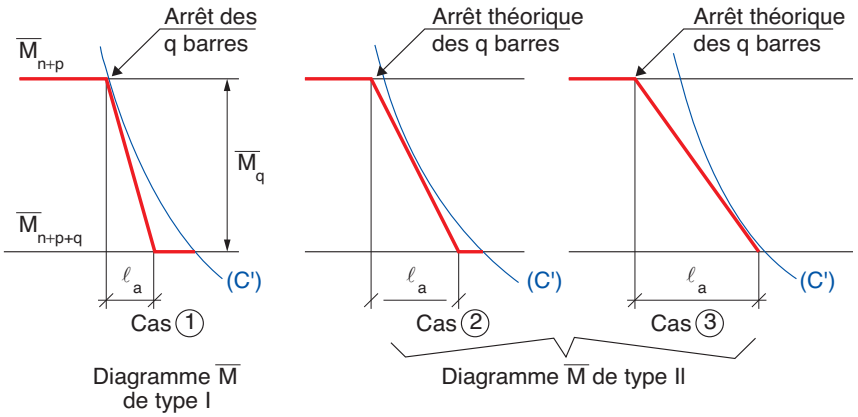
- commencer par celles de la nappe la plus haute ;
- dans chaque nappe, arrêter d'abord les barres les plus proches du plan moyen.



Pour les armatures supérieures : mêmes règles que ci-dessus, en commençant par les nappes les plus basses.

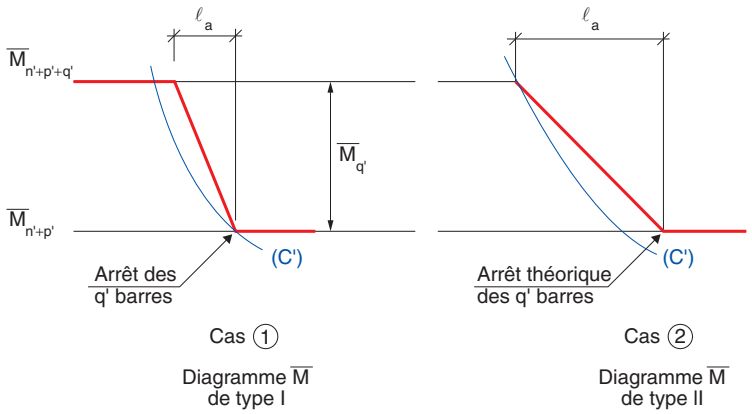
2.5.2 Arrêt des armatures inférieures

Suivant la position des segments inclinés du diagramme des moments admissibles $\overline{M}$ par rapport à la courbe enveloppe décalée, il y a trois cas possibles :



2.5.3 Arrêt des armatures supérieures

Suivant la position des segments inclinés du diagramme des moments admissibles $\overline{M}$ par rapport à la courbe enveloppe décalée, il y a deux cas possibles :



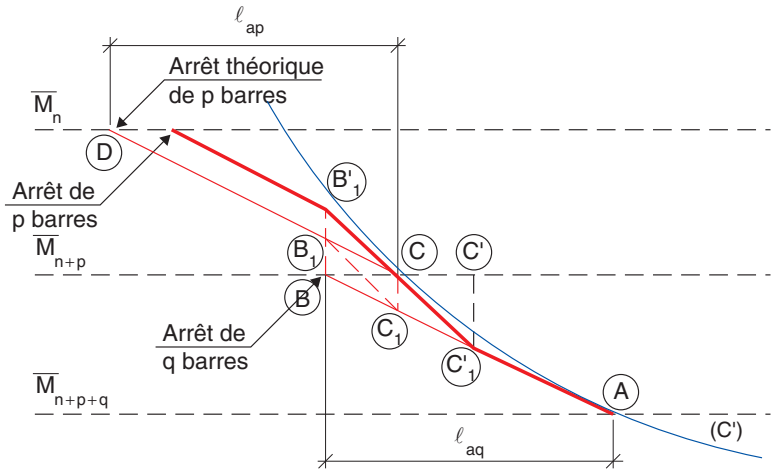
2.5.4 Remarques

L'épure se construit toujours en partant du moment maximal (positif ou négatif).

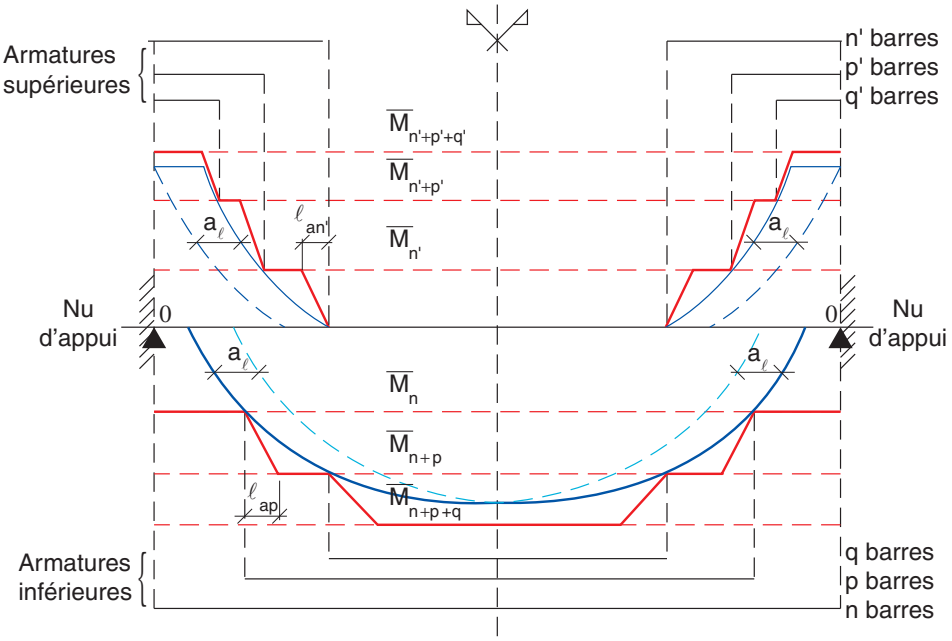
Pour les cas ①, correspondant au diagramme de type I, les arrêts sont toujours sur la courbe enveloppe décalée (C').

Pour les cas ② ou ③, on se sert de la propriété des diagrammes de type II pour envelopper au mieux la courbe enveloppe décalée (C') et optimiser les longueurs des barres.

Exemple pour les armatures inférieures



2.5.5 Exemple de diagramme de type I



2.5.6 Remarques complémentaires

Sur appuis, conserver et ancrer une section d'aciers inférieurs suffisante et telle que :

- pour un appui simple d'extrémité[3] (voir § 9.1.1 du chapitre 8 : « Effort tranchant ») :

$$A_s \geq \text{Max}\begin{cases} \dfrac{F_E}{f_{yd}} = \dfrac{|V_{Ed}|\dfrac{a_1}{z} + N_{Ed}}{f_{yd}} \\ \beta_2 . A_1 \end{cases}$$

avec :

A_1 = section d'aciers longitudinaux en travée,

V_{Ed} = effort tranchant de calcul au nu d'appui,

N_{Ed} = effort normal de calcul (positif pour une traction),

3. EC 2 – 9.2.1.4 (1) & (2)

$$a_1 = \frac{z\left(\cot g\theta - \cot g\alpha\right)}{2},$$

$\beta_2 =$ 0,25 valeur recommandée ou fixée par l'Annexe nationale[4],

l'Annexe nationale française préconise $\beta_2 =$ 0,0 avec la vérification suivante sur appui[5] :

$$A_s \geq \frac{F_E}{f_{yd}} = \frac{V_{Ed}\frac{a_1}{z} + N_{Ed} + \frac{M_{Ed}}{z}}{f_{yd}}$$

avec :

M_{Ed} = moment fléchissant concomitant (nul sur appui simple d'about),

- pour un appui intermédiaire (voir § 9.3 du chapitre 8 : « Effort tranchant ») :

$A_s \geq \beta_2 . A_1$ A_1 = section d'armatures longitudinales en travée[6],

$\beta_2 = \frac{1}{4}$: valeur recommandée ou fixée par l'Annexe nationale[7],

l'Annexe nationale française préconise $\beta_2 =$ 0,0 avec la vérification suivante sur appui[8] :

$$A_s \geq \frac{F_E}{f_{yd}} = \frac{V_{Ed}\frac{a_1}{z} + N_{Ed} + \frac{M_{Ed}}{z}}{f_{yd}}$$

avec :

M_{Ed} = moment fléchissant concomitant.

- les barres d'angle (⑤ ou ④, schémas du § 2.5.1) ne sont donc généralement pas arrêtées.

Même lorsque l'épure d'arrêt des armatures supérieures n'exige plus de barres, prévoir des barres de montage pour tenir les armatures d'âme.

Dans une poutre de hauteur variable :

- porter en ordonnée les sections d'aciers calculées en quelques points en tenant compte de la variation de z ;
- le décalage de a_1, variable le long de la poutre, est appliqué à la courbe des sections d'aciers.

4. EC 2 – voir AN
5. EC 2 – AN
6. EC 2 – 9.2.1.4 (1)
7. EC 2 – voir AN
8. EC 2 – AN

3. Répartition des armatures d'âme

3.1 Cas des poutres de section constante soumises à des charges uniformes

(voir § 8 du chapitre 8 : « Effort tranchant »)

3.2 Cas général

Il s'agit de poutres :

- supportant des charges concentrées ;
- et/ou de hauteur variable.

Méthode :

1/ calculer les espacements pour un tracé d'armatures d'âme donné :

- initial :
  - dans la section à la distance d du nu d'appui en cas de prédominance des charges réparties pour l'effort tranchant V_{Ed0} (ou V'_{Ed0} s'il y a des charges concentrées au voisinage de l'appui),
  - dans la section au nu d'appui dans les autres cas pour l'effort tranchant V_{Ed} (ou V'_{Ed0} s'il y a des charges concentrées au voisinage de l'appui) :

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{Ed}}{z.f_{ywd}\left(\cot g\theta + \cot g\alpha\right).\sin\alpha}$$

$$\Rightarrow \quad s_0 = \frac{A_{sw}.z\left(\cot g\theta + \cot g\alpha\right).\sin\alpha}{V_{Ed}} f_{ywd}$$

en remplaçant V_{Ed} par V_{Ed0} ou V'_{Ed0} s'il y a transmission directe des charges aux appuis

avec :

$$\frac{A_{sw,\,max}.f_{ywd}}{b_w.s} \le \frac{\frac{1}{2}\nu_1.f_{cd}.\sin\alpha}{1-\cos\alpha}$$

$$\Rightarrow \quad s_0 \ge \frac{2.A_{sw,\,max}}{b_w}.\frac{1-\cos\alpha}{\sin\alpha}.\frac{f_{ywd}}{\nu_1.f_{cd}}$$

- intermédiaires, immédiatement à gauche et à droite des sections où agissent les charges concentrées ;

2/ tracer la courbe (E) représentative de $s(x)$;

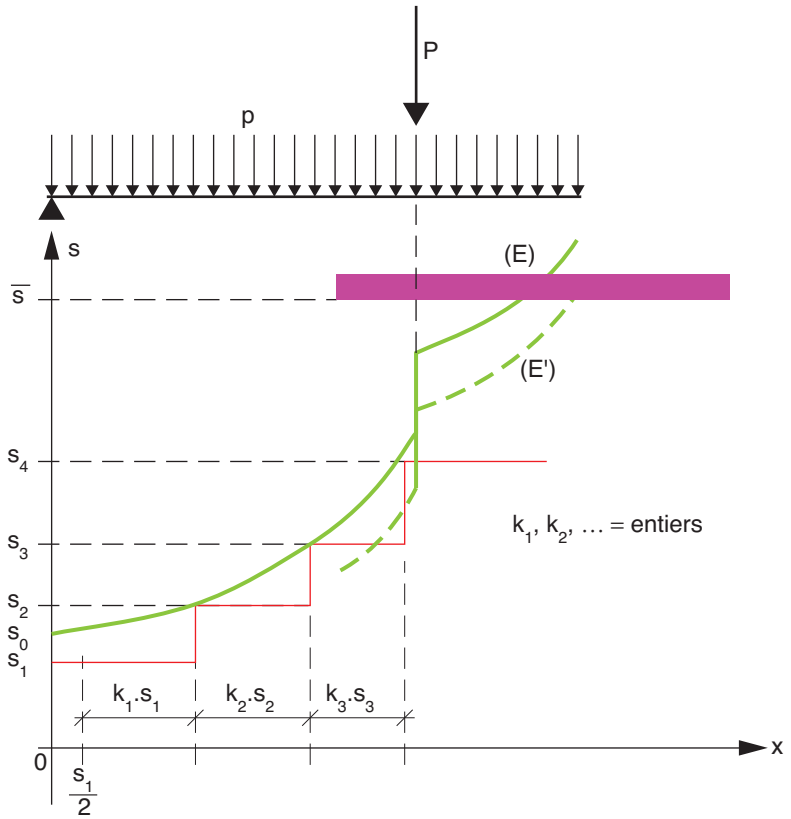
3/ choisir $s_1 \le s_0$ (entier $\ge$ 7 cm) ;

4/ placer la première nappe d'armatures d'âme à $\frac{s_1}{2}$ du nu d'appui et répéter s_1 un nombre entier de fois jusqu'à ce qu'il soit possible de passer à un espacement (entier) supérieur, et ainsi de suite, en enveloppant par dessous la courbe (E) ;

5/ arrêter le processus pour l'espacement s_M immédiatement inférieur à :

$$\bar{s} = \text{Min}\begin{cases} \dfrac{A_{sw}}{b_w.\sin\alpha}.\dfrac{f_{yk}}{0{,}08.\sqrt{f_{ck}}} \\ 0{,}75.d(1+\text{cotg}\alpha) \\ 15.\phi \text{ si } A_{s2} \neq 0 \end{cases}$$

(puisque $\rho_w = \dfrac{A_{sw}}{s.b_w.\sin\alpha} \geq 0{,}08\dfrac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \Rightarrow s \leq \dfrac{A_{sw}}{b_w.\sin\alpha}.\dfrac{f_{yk}}{0{,}08.\sqrt{f_{ck}}}$)



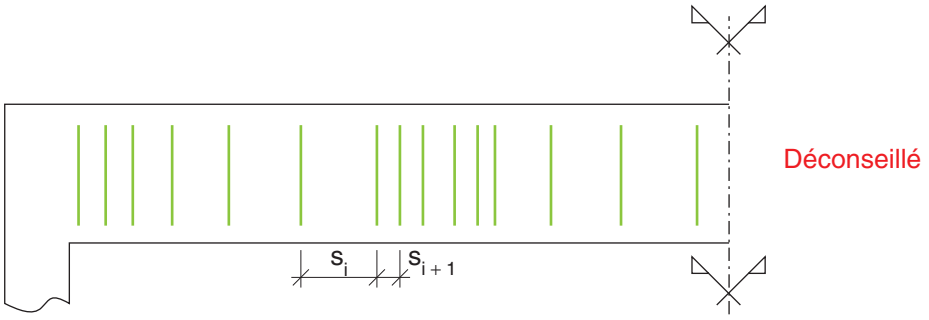
6/ lorsque $s > \bar{s}$, diminuer A_{sw} par :

- changement de tracé ;
- ou diminution de ϕ_t ;

d'où une nouvelle courbe (E') que l'on peut envelopper à nouveau par dessous au moyen des étapes 4/ et 5/. On a alors deux possibilités :

- soit adopter le nouveau tracé A_{sw} et recommencer dès le début si $s_0 \geq 7$ cm, en enveloppant (E') par-dessous ;
- soit continuer en enveloppant (E') au-delà de la section où l'on a réduit A_{sw}.

S'arranger pour que s soit toujours croissant de s_1 à $\bar{s}$ avec des hauteurs de marches $(s_{i+1} - s_i)$ toujours plus grandes. En particulier, lorsque l'on change de tracé pour A_{sw}, éviter de retomber à $s_{i+1} < s_i$ pour ne pas compliquer le ferraillage.



11 Flexion composée

I. RAPPELS THÉORIQUES

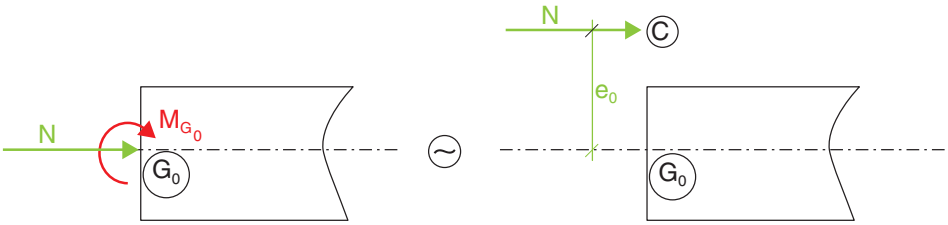
1. Généralités – Introduction

1.1 Généralités

On désigne par (sollicitations fournies par les calculs de résistance des matériaux) :

- M_{G_0} le moment de flexion (ultime ou de service) par rapport au centre de gravité de la section de béton seul (de signe quelconque) ;
- N l'effort normal (ultime ou de service) ; par convention :
  - positif pour une compression ;
  - négatif pour une traction.

Le système (M_{G_0}, N) est équivalent à une force unique équipollente à N et appliquée en un point C (centre de pression) contenu dans le plan moyen. La distance G_0C est appelée excentricité de la force extérieure (équipollente à l'effort normal N et passant par C) par rapport à G_0.



$$e_0 = \frac{M_{G_0}}{N}$$

En flexion composée, sollicitation vectorielle, la valeur du moment de flexion dépend du point où l'on effectue la réduction des forces :

- si ce point est le centre de gravité G_0 du béton seul :

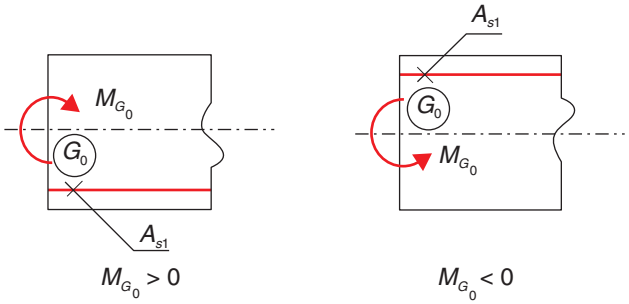
$$M_{G_0} \Rightarrow e_0 = \frac{M_{G_0}}{N}$$

- si ce point est le centre de gravité A_{s1} des armatures tendues :

$$M_A \Rightarrow e_A = \frac{M_A}{N}$$

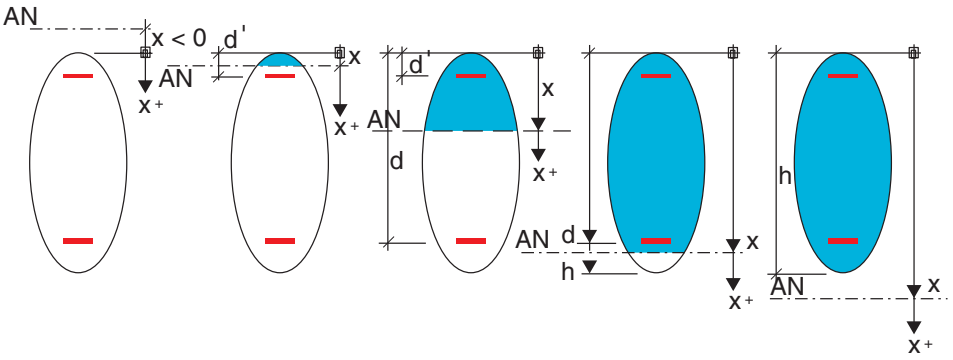
En flexion composée, la première chose à faire est de rechercher la position du centre de pression en calculant $e_0 = \frac{M_{G_0}}{N}$ (M_{G_0} étant le moment résultant des calculs de RdM).

Le signe de M_{G_0} fournit la position des aciers les plus tendus (ou les moins comprimés) :



Les effets de V sont étudiés séparément de ceux de M et N (voir chapitre 8 : « Effort tranchant »).

En repérant la position de l'axe neutre par sa profondeur x comptée positivement vers le bas depuis la fibre supérieure, on a les cinq cas de figure possibles suivants lorsque M > 0 :



x < 0	0 ≤ x < d'	d' ≤ x < d	d ≤ x < h	x ≥ h
SECTION ENTIÈREMENT TENDUE	Section avec deux nappes d'aciers tendus	Section avec une seule nappe d'aciers tendus	Section avec deux nappes d'aciers comprimés	SECTION ENTIÈREMENT COMPRIMÉE
	0 ≤ x ≤ h ⇒ SECTION PARTIELLEMENT TENDUE			

1.2 Prise en compte des imperfections géométriques et des effets du second ordre en flexion-compression à l'ELU

On désigne par[1] :

ℓ_0 = longueur efficace (longueur de flambement de la pièce) définie au § 2.1, chapitre 6 : « Compression centrée »,

h = hauteur de la section droite dans le plan de flexion,

ℓ = longueur libre de la pièce,

i = rayon de giration de la section de béton non fissurée,

$$\lambda = \frac{\ell_0}{i} \text{ élancement de la pièce.} \qquad \textbf{(5.14)}$$

1.2.1 Imperfections géométriques

Les écarts sur les dimensions des sections sont normalement pris en compte dans les coefficients partiels de sécurité relatifs aux matériaux. En dehors du cas visé au § 1.2.1.3, il n'y a donc pas lieu d'en tenir compte[2].

1.2.1.1 Cas général

Les imperfections sont représentées par une inclinaison globale θ_i de la structure (voir § 2.4, chapitre 1 : « Analyse structurale », *Maîtrise de l'eurocode 2*, J. Roux, Éditions Eyrolles, 2009).

1.2.1.2 Cas des voiles et poteaux isolés des structures contreventées

Une solution alternative simplifiée consiste à prendre en compte une excentricité additionnelle telle que[3] :

$$e_i = \frac{\ell_0}{400}$$

1.2.1.3 Cas des sections droites avec un ferraillage symétrique

Pour tenir compte des écarts sur les dimensions des sections, prendre à l'ELU[4] :

$$M_{EdG_0} = M_{Ed} + N_{Ed}.\Delta e_0$$

avec :

N_{Ed} = effort normal ultime de compression,

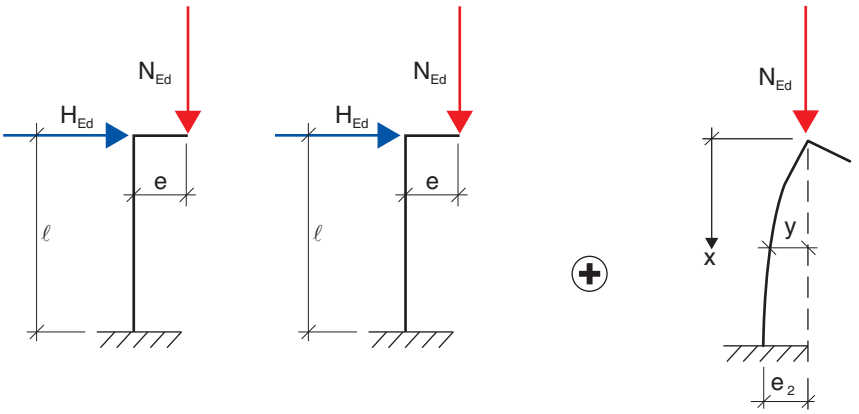
1. EC 2 – 5.8.3.2 (1)
2. EC 2 – 5.2 (1)P
3. EC 2 – 5.2 (7)a + 5.2 (9)
4. EC 2 – 5.2 (1)P + 6.1 (4)

$$\Delta e_0 = \text{Max}\begin{cases} 20\ \text{mm} \\ \dfrac{h}{30} \end{cases}$$

où :
h = hauteur de la section.

1.2.2 Effets du second ordre

Les effets du second ordre traduisent l'influence des déformations sur le moment de flexion :



1^{er} ordre : déformations de la pièce négligées.

$$M_{Ed1G_0}(x) = N_{Ed}.e + H_{Ed}.x$$

En pied de poteau ($x = \ell$) :

$$e_1 = \frac{M_{Ed1G0}(\ell)}{N_{Ed}} = e + \frac{H_{Ed}}{N_{Ed}}\ell$$

2^{e} ordre : déformations.

$$M_{Ed2G_0}(x) = N_{Ed}.y$$

En pied de poteau ($x = l$) :

$$e_2 = \frac{M_{Ed2G_0}(l)}{N_{Ed}}$$

Il est inutile de vérifier la pièce au flambement et l'on peut se contenter d'un calcul en flexion composée (sans tenir compte des effets du second ordre) sous les sollicitations :

$$N_{Ed} = \sum_i \gamma_i.N_i$$

$$M_{EdG_0} = N_{Ed}.e_0$$

$$e_0 = \underbrace{\frac{\sum_j \gamma_j.M_{jG_0}}{\sum_i \gamma_i.N_i}}_{e_1} + e_i + \Delta e_0 : \text{excentricité du premier ordre à l'ELU}$$

avec :

e_i = excentricité additionnelle définie aux § 1.2.1.1 et 1.2.1.2,

Δe_0 = supplément d'excentricité donné au § 1.2.1.3.

dans les cas ci-après :

1.2.2.1 Cas des éléments isolés

Il faut vérifier[5] :

$$\boxed{\lambda = \frac{l_0}{i} < \lambda_{lim} = \frac{20.A.B.C}{\sqrt{n}}} \qquad \textbf{(5.13N)}$$

valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[6]

avec :

$A = \dfrac{1}{1 + 0,2.\varphi_{ef}} = 0,7$ si φ_{ef} est inconnu,

$B = \sqrt{1 + 2.\omega} = 1,1$ si ω est inconnu,

$C = 1,7 - r_m = 0,7$ si r_m est inconnu,

$n = \dfrac{N_{Ed}}{A_c.f_{cd}}$ = effort normal relatif,

où :

$\varphi_{ef} = \varphi(\infty,\ t_0)\dfrac{M_{OEqp}}{M_{OEd}}$ = coefficient de fluage effectif, **(5.19)**

$\varphi(\infty,\ t_0)$ = valeur finale du coefficient de fluage[7] (voir § 2.3.3.4, chapitre 2 : « Matériaux »),

M_{OEqp} = moment de service du premier ordre sous la combinaison d'actions quasi permanente[8] (ELS),

M_{OEd} = moment ultime du premier ordre sous la combinaison de charges de calcul (y compris imperfections géométriques[9]),

$\omega = \dfrac{A_s.f_{yd}}{A_c.f_{cd}}$ = pourcentage mécanique d'armatures,

---

5. EC 2 – 5.8.3.1 (1)
6. EC 2 – voir AN
7. EC 2 – 3.1.4 (4)
8. EC 2 – 5.8.4 (2)
9. EC 2 – voir AN

A_s = aire totale des armatures longitudinales,

A_c = aire de la section droite (béton seul),

$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$ ($\alpha_{cc} = 1$ valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[10]),

$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$,

$$r_m = \begin{cases} 1 : \text{éléments non contreventés en général,} \\ 1 : \text{éléments contreventés avec moments du premier ordre dus principalement à des imperfections ou à des charges transversales,} \\ \frac{M_{01}}{M_{02}} : \text{autres cas.} \end{cases}$$

M_{01} et M_{02} = valeurs algébriques des moments du premier ordre aux deux extrémités de l'élément avec : $|M_{02}| \geq |M_{01}|$.

1.2.2.2 Cas des structures

Les dispositions de ce paragraphe ne s'appliquent pas au cas des ponts[11].

Lorsque les conditions suivantes sont remplies[12] :

- la structure est raisonnablement symétrique (absence de torsion) ;
- les déformations globales dues au cisaillement sont négligeables (contreventement assuré par des voiles sans grandes ouvertures) ;
- les éléments de contreventement sont fixés rigidement à leur base ;
- la rigidité des éléments de contreventement est raisonnablement constante sur toute leur hauteur ;
- la charge verticale totale augmente approximativement de la même quantité à chaque étage ;

il faut vérifier :

$$F_{V,\,Ed} \leq k_1 \frac{n_s}{n_s + 1,6} . \frac{\sum E_{cd} . I_c}{L^2} \qquad \textbf{(5.18)}$$

10. EC 2 – voir AN
11. EC 2 – 5.8.3.3 (101)
12. EC 2 – 5.8.3.3 (1)

avec :

$F_{V,\,Ed}$ = charge verticale totale (sur les éléments contreventés et les éléments de contreventement)

n_s = nombre d'étages,

L = hauteur totale du bâtiment au-dessus du niveau d'encastrement du moment,

E_{cd} = valeur de calcul du module d'élasticité du béton,

I_c = moment d'inertie de l'élément de contreventement (béton non fissuré),

$k_1 = 0,31$: valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[13].

Remarque

Lorsque l'on peut montrer que les éléments de contreventement sont non fissurés à l'ELU, on peut prendre :

$k_1 = k_2 = 0,62$: valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française[14].

2. Sections partiellement tendues

2.1 Domaine d'application

2.1.1 À l'ELS

On pose :

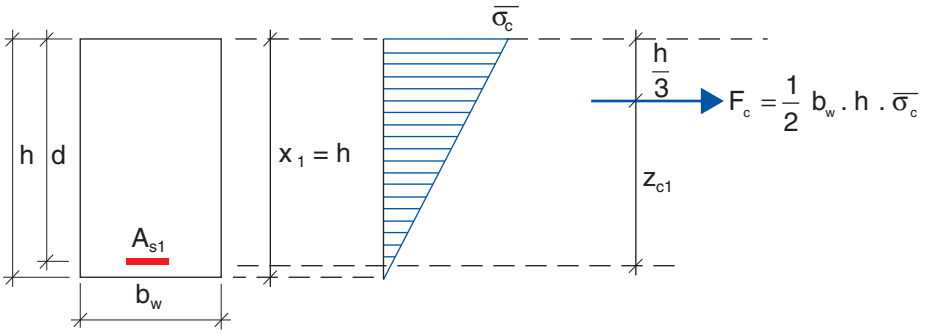
$$e_{0ser} = \frac{M_{serG_0}}{N_{ser}}$$

La section est partiellement tendue si :

2.1.1.1 N_{ser} étant une compression ($N_{ser} > 0$)

$\Rightarrow$ pour une section rectangulaire sans aciers comprimés, il faut que $x_1 \leq h$, d'où :

13. EC 2 – voir AN
14. EC 2 – 5.8.3.3 (2) + voir AN



$$M_{serA} \leq M_{ser\,lim} = \frac{1}{2} b_w . h . \overline{\sigma_c} \left(d - \frac{h}{3} \right) = \frac{1}{2} . \frac{h}{d} \left(1 - \frac{1}{3} . \frac{h}{d} \right) b_w . d^2 . \overline{\sigma_c}$$

avec :

M_{serA} = moment de service par rapport aux aciers tendus (même signe que M_{serG_0}).

La nappe d'aciers n'est effectivement tendue que si la position de l'axe neutre est telle que $x_1 \leq d$. Soit, en faisant $h = d$ dans l'expression précédente :

$$M_{serA} \leq \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{3} \right) b_w . d^2 . \overline{\sigma_c} = 0,333 . b_w . d^2 . \overline{\sigma_c}$$

2.1.1.2 N_{ser} étant une traction ($N_{ser} < 0$)

⇒ Le centre de pression C est à l'extérieur des traces des armatures.

2.1.2 À l'ELU

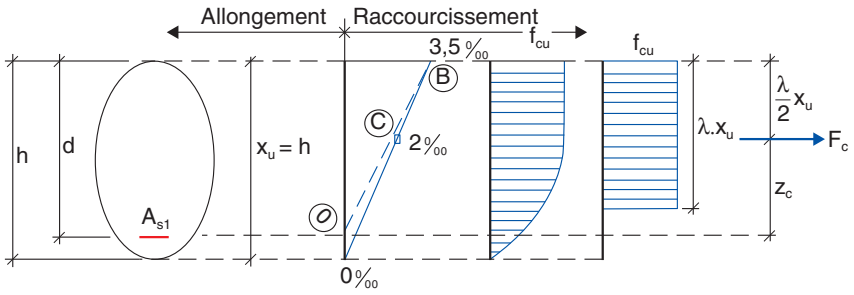
On pose :

$$e_0 = \underbrace{\frac{\sum_j \gamma_j . M_{jG_0}}{\sum_i \gamma_i . N_i}}_{e_1} + e_i + \Delta e_0 \text{ : excentricité du premier ordre à l'ELU}$$

La section est partiellement tendue si :

2.1.2.1 N_{Ed} étant une compression ($N_{Ed} > 0$)

(dans ce cas : $N_{Ed} > 0$ et $e_0 \neq e_{0ser}$ avec $x_u \leq h$) :



pour une section rectangulaire en l'absence d'aciers comprimés avec $x_u = h$

$$\Rightarrow \left.\begin{array}{l} F_c = \lambda.b_w.h.f_{cu} \\ z_c = d - \dfrac{\lambda}{2}h \end{array}\right\} \Rightarrow M_{BC} = F_c.z_c$$

soit, en considérant les moments par rapport aux aciers tendus :

$$M_{BC} = \lambda \frac{h}{d}\left(1 - \frac{\lambda}{2}.\frac{h}{d}\right) b_w.d^2.f_{cu}$$

d'où :

$$\boxed{\mu_{BC} = \frac{M_{BC}}{b_w.d^2.f_{cu}} = \lambda \frac{h}{d}\left(1 - \frac{\lambda}{2}.\frac{h}{d}\right)}$$

et la section est partiellement tendue tant que $x_u \leq h$ c'est-à-dire tant que :

$$\mu_{cu} = \frac{M_{EdA}}{b_w.d^2.f_{cu}} \leq \mu_{BC} = \lambda \frac{h}{d}\left(1 - \frac{\lambda}{2}.\frac{h}{d}\right)$$

avec :

M_{EdA} = moment fléchissant ultime par rapport aux aciers tendus (même signe que M_{EdG_0}).

La nappe d'aciers n'est effectivement tendue que si :

$$x_u \leq d \Rightarrow \mu_{cu} \leq \mu_{BO} = \lambda\left(1 - \frac{\lambda}{2}\right) = 0,480 \text{ si } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa.}$$

2.1.2.2 N_{Ed} étant une traction ($N_{Ed} < 0$)

Le centre de pression C est à l'extérieur des traces des armatures (dans ce cas : $e_0 = \dfrac{\sum_j \gamma_j . M_{jG_0}}{\sum_i \gamma_i . N_i} \neq e_{0ser}$ à moins que les M_{jG_0} et les N_i ne proviennent d'une action unique, auquel cas $e_0 = e_{0ser}$).

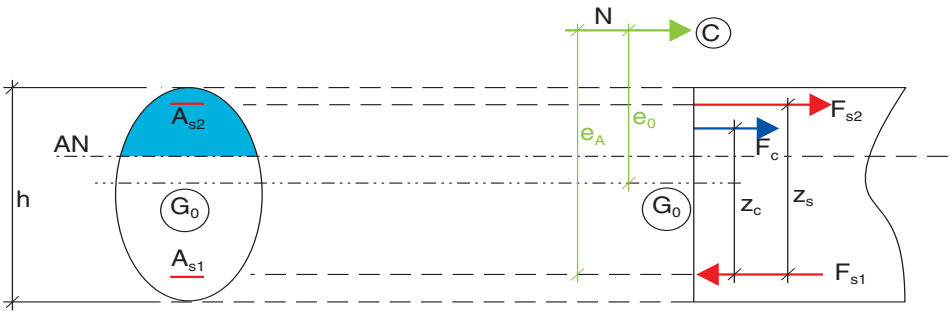
2.2 Calcul des armatures

2.2.1 Méthode de calcul

On se place dans le cas où l'une au moins des nappes d'armatures est tendue.

D'après le principe d'équivalence (RdM), le système des forces internes et le système des forces extérieures doivent avoir :

- même résultante générale ;
- même moment résultant.



En prenant les moments par rapport aux aciers tendus, les équations d'équilibre s'écrivent :

$$\begin{cases} M_A = N.e_A = F_{s2}.z_s + F_c.z_c \\ N = F_c + F_{s2} - F_{s1} \end{cases}$$

soit en tenant compte des sections A_{s1} et A_{s2} d'armatures :

$$\begin{cases} M_A = N.e_A = A_{s2}.\sigma_{s2}.z_s + F_c.z_c \\ N = F_c + A_{s2}.\sigma_{s2} - A_{s1}.\sigma_{s1} \quad \Leftrightarrow \quad F_c + A_{s2}.\sigma_{s2} - \left(A_{s1} + \dfrac{N}{\sigma_{s1}} \right) \sigma_{s1} = 0 \end{cases}$$

Les équations d'équilibre de la même section soumise en flexion simple au moment M_A, aux mêmes déformations (donc aux mêmes contraintes et de même axe neutre) et munie des sections d'armatures A_{s1} et A_{s2} s'écrivent :

$$\begin{cases} M_A = \mathcal{A}_{s2}.\sigma_{s2}.z_s + F_c.z_c \\ 0 = F_c + \mathcal{A}_{s2}.\sigma_{s2} - \mathcal{A}_{s1}.\sigma_{s1} \end{cases}$$

D'où, par identification, il vient :

$$\boxed{\begin{aligned} A_{s2} &= \mathcal{A}_{s2} \\ A_{s1} &= \mathcal{A}_{s1} - \frac{N}{\sigma_{s1}} \end{aligned}}$$

2.2.2 Technique du calcul

Calculer le moment M_A (M_{EdA} ou M_{serA}) par rapport aux aciers tendus,

$\Rightarrow$ en déduire par le calcul en flexion simple les sections A_{s1} et A_{s2} des armatures,

$\Rightarrow$ revenir à la flexion composée avec les sections d'aciers :

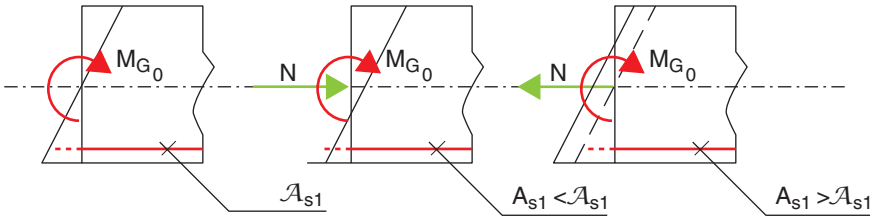
$$\begin{cases} A_{s2} = \mathcal{A}_{s2} \\ A_{s1} = \mathcal{A}_{s1} - \dfrac{N}{\sigma_{s1}} \end{cases}$$

où :

N (N_{Ed} ou N_{ser}) en valeur algébrique,

σ_{s1} à l'état limite déterminant pour le calcul de $\mathcal{A}_{s1}$.

2.2.3 Remarques



Flexion simple Flexion-compression Flexion-traction

N est une compression (N > 0) $\Rightarrow$ diminution de la section d'aciers tendus trouvée en flexion simple.

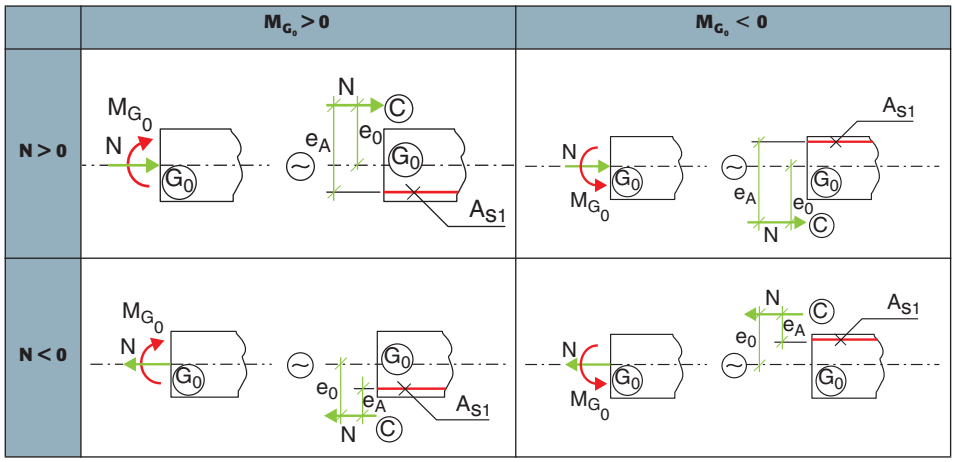
N est une traction (N < 0) $\Rightarrow$ augmentation de cette section.

Si $A_{s1} < 0$ ($\Leftrightarrow$ $A_{s1} < \dfrac{N}{\sigma_{s1}}$) cela veut dire que x > d. Dans ce cas, les aciers sont tous comprimés et l'équation d'équilibre des forces doit être écrite :

$$N = F_c + A_{s2}.\sigma_{s2} + A_{s1}.\sigma_{s1}$$

L'assimilation à la flexion simple n'est plus possible et tant que l'on n'a pas une section entièrement comprimée, il suffit de prévoir la section minimale d'armatures en flexion simple.

2.2.4 Positions relatives de A_{s1}, G_0 et C



Si N est une compression, C est à l'opposé de A_{s1} (centre de gravité des aciers tendus) par rapport à G_0.

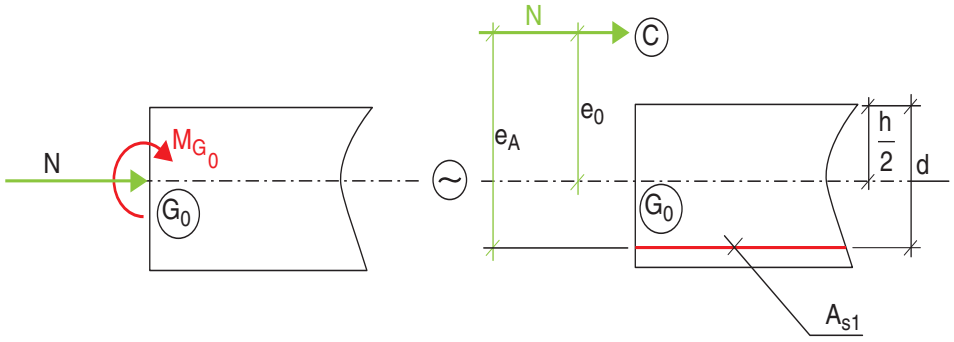
Dans ce cas : $|e_A| > |e_0|$.

Si N est une traction, C et A_{s1} sont du même côté par rapport à G_0.

Dans ce cas : $|e_A| < |e_0|$

2.2.5 Cas des sections rectangulaires

Moment au centre de gravité des aciers tendus (en valeur absolue) :



$$\begin{cases} M_A = M_{G_0} + N\left(d - \dfrac{h}{2}\right) \\ N \text{ avec son signe} \end{cases}$$

Comme la sollicitation de flexion composée est une sollicitation vectorielle, et que les coefficients de pondération des actions ne sont pas nécessairement les mêmes pour le moment et pour l'effort normal, il n'est pas possible de savoir de façon simple, a priori, s'il faut ou non des aciers comprimés.

Dans le cas où la contrainte de compression du béton est limitée (classes d'exposition XD, XF et XS), les tableaux donnant les moments limites ultimes réduits μ_{lu}, pour des aciers S 500 et $f_{ck} \leq 35$ MPa, figurent dans l'annexe A3 en fin d'ouvrage[15].

Dans le cas où la contrainte de compression du béton n'est pas limitée , on a :

$\mu_{lu} = \mu_{ls}$ donné par le tableau du § 2.3.2, chapitre 7 : « Flexion simple ».

Nécessité d'aciers comprimés :

- absence de limitation de la contrainte des aciers tendus :

  $M_{EdA} \leq M_{lu} \quad \Rightarrow \quad A_{s2} = 0$

- limitation de la contrainte des aciers tendus :

  $M_{serA} \leq M_{rc} \quad \Rightarrow \quad A_{s2} = 0.$

  Faire bien attention au fait que c'est le moment M_A (M_{EdA} ou M_{serA}) qui est à comparer au moment limite (M_{lu} ou M_{rc}) et non le moment M_{G_0}

Dans le cas ou A_{s2} préexiste, la méthode de calcul exposée au § 2.2.2 s'applique :

1/ en prenant à l'ELU :

$$M_{BO} = 0,48.b_w.d^2.f_{cu} + A_{s2}.f_{yd}\left(d - d'\right)$$

(valeur sécuritaire puisque, dans le cas du diagramme d'aciers à palier incliné $\sigma_{s2u} = A + B.\varepsilon_{s2} \geq f_{yd}$),

2/ en prenant à l'ELS lorsque la contrainte de compression du béton est limitée (classes d'exposition XD, XF et XS) :

$$M_{ser\,lim} = 0,333.b_w.d^2.\overline{\sigma_c} + A_{s2}.\sigma_{s2}\left(d - d'\right) \text{ avec : } \sigma_{s2} = \alpha_e.\overline{\sigma_c}\,\frac{d - d'}{d}$$

3/ en vérifiant que : $A_{s2,\,calculé} \leq A_{s2}$.

15. [annexe A3]

Remarque

Pour une section rectangulaire sollicitée en flexion composée avec traction à l'ELS lorsque la limitation de la contrainte des aciers tendus est imposée, si $M_{serA} \leq M_{rc}$:

$$A_{s1,\,ser} = \frac{M_{serA}}{\overline{z_c}.\overline{\sigma_s}} - \frac{N_{ser}}{\overline{\sigma_s}} \text{ avec : } \overline{\alpha_1} = \frac{\alpha_e.\overline{\alpha_c}}{\alpha_e.\overline{\alpha_c} + \overline{\sigma_s}} \text{ et } \overline{z_c} = d\left(1 - \frac{\overline{\alpha_1}}{3}\right)$$

or :

$$M_{serA} = M_{serG_0} + N_{ser}\left(d - \frac{h}{2}\right) \text{ en valeur algébrique}$$

d'où :

$$A_{s1,\,ser} = \frac{M_{serG_0}}{\overline{z_c}.\overline{\sigma_s}} + \frac{N_{ser}\left(d - \frac{h}{2}\right)}{\overline{z_c}.\overline{\sigma_s}} - \frac{N_{ser}}{\overline{\sigma_s}}$$

comme : $\overline{z_c} < 2\left(d - \frac{h}{2}\right)$, on en déduit :

$$A_{s1,\,ser} > \frac{M_{serG_0}}{\overline{z_c}.\overline{\sigma_s}} - \frac{N_{ser}}{2.\overline{\sigma_s}} \text{ avec : } N_{ser} < 0$$

expression que l'on met sous la forme :

$$A_{s1,pp} = \underbrace{\frac{M_{serG_0}}{\overline{z_c}.\overline{\sigma_s}}}_{\substack{\text{FLEXION SIMPLE} \\ M_{serG_0}}} + \underbrace{\frac{|N_{ser}|}{2.\overline{\sigma_s}}}_{\substack{\text{DEMI TRACTION SIMPLE} \\ N_{ser}}}$$

La remarque précédente ne s'applique pas dans le cas de la flexion-compression car, x_1 augmentant, $\overline{z_c}$ devient très petit devant $2\left(d - \frac{h}{2}\right)$ et $A_{s1,\,app}$ surpasse trop $A_{s1,\,réel}$

Si $e_1 >> h$, à l'ELU comme à l'ELS, le calcul en flexion simple sous M_{G_0} donne sensiblement la même section d'acier qu'en flexion composée sous M_A et N. À titre indicatif, on peut se contenter du calcul en flexion simple sous M_{G_0} dès que :

$e_1 > 4.h.$

(Il suffit de remarquer qu'en flexion simple $N = 0 \Rightarrow e_1 = \frac{M_{G_0}}{N} \to \infty$)

2.2.6 Section en T à l'ELU

On suppose que le signe du moment M_{EdA} est tel que la table est comprimée.

2.2.6.1 Cas où $M_{EdA} \leq M_{Tu}$

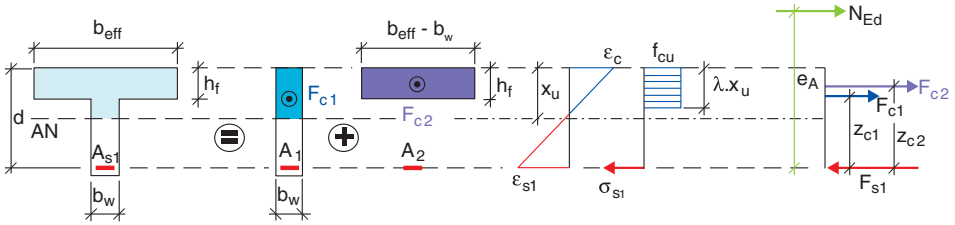
La zone comprimée a une forme rectangulaire.

Donc calcul en section rectangulaire de largeur b_{eff} soumise à (M_{EdA}, N_{Ed}).

2.2.6.2 Cas où $M_{EdA} > M_{Tu}$

La zone comprimée a une forme de T.

On opère par décomposition de la section :



Les équations d'équilibre s'écrivent :

$$\begin{cases} M_{EdA} = F_{c1}.z_{c1} + F_{c2}.z_{c2} \\ N_{Ed} = F_{c1} + F_{c2} - F_{s1} \end{cases}$$

avec :

$$\begin{cases} F_{c1} = \lambda.b_w.x_u.f_{cu} \quad \text{et} \quad z_{c1} = d - \dfrac{\lambda}{2}x_u \\ F_{c2} = (b_{eff} - b_w)h_f.f_{cu} \quad \text{et} \quad z_{c2} = d - \dfrac{h_f}{2} \\ F_{s1} = A_{s1}.\sigma_{s1} \end{cases}$$

donc :

$$\begin{cases} M_{EdA} = \lambda.b_w.x_u.f_{cu}\left(d - \dfrac{\lambda}{2}x_u\right) + (b_{eff} - b_w)h_f.f_{cu}\left(d - \dfrac{h_f}{2}\right) \\ N_{Ed} = \lambda.b_w.x_u.f_{cu} + (b_{eff} - b_w)h_f.f_{cu} - A_{s1}.\sigma_{s1} \end{cases}$$

et en posant :

$$\begin{cases} M_{EdR} = M_{EdA} - (b_{eff} - b_w)h_f.f_{cu}\left(d - \dfrac{h_f}{2}\right) \\ N_{EdR} = N_{Ed} - (b_{eff} - b_w)h_f.f_{cu} \end{cases}$$

il vient :

$$\begin{cases} M_{EdR} = \lambda.b_w.x_u.f_{cu}\left(d - \dfrac{\lambda}{2}x_u\right) \\ N_{EdR} = \lambda.b_w.x_u.f_{cu} - A_{s1}.\sigma_{s1} \end{cases}$$

soit les équations d'équilibre d'une section rectangulaire $b_w.d$ soumise à M_{EdR} et N_{EdR}.

Donc, calcul en section rectangulaire $b_w.d$ soumise à :

$$\boxed{\begin{cases} M_{EdR} = M_{EdA} - \left(b_{eff} - b_w\right)h_f.f_{cu}\left(d - \dfrac{h_f}{2}\right) \\ N_{EdR} = N_{Ed} - \left(b_{eff} - b_w\right)h_f.f_{cu} \end{cases}}$$

Il faut prendre garde à bien retrancher de A_{s1} la quantité $\dfrac{N_{EdR}}{\sigma_{s1}}$ (N_{EdR} en valeur algébrique) et non pas $\dfrac{N_{Ed}}{\sigma_{s1}}$

2.3 Section minimale d'armatures

2.3.1 Cas général

Il faut vérifier (valeurs recommandées et à utiliser pour l'Annexe nationale française[16]) :

$$\boxed{A_{s1} \geq A_{s,\,min} = \text{Max}\begin{cases} 0,26\dfrac{f_{ct,\,eff}}{f_{yk}}b_t.d \\ 0,0013.b_t.d \end{cases}} \quad \textbf{(9.1N)}$$

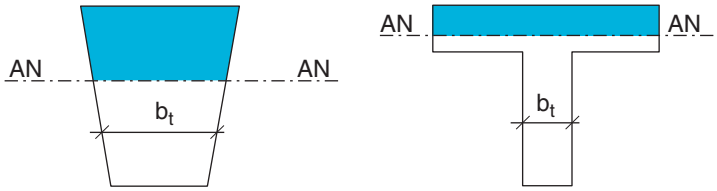
avec[17] :

$$f_{ct,\,eff} = \begin{cases} f_{ctm} : \text{si la maîtrise de la fissuration est requise,} \\ f_{ctm,\,fl} = \text{Max}\begin{cases}\left(1,6 - \dfrac{h}{1\,000}\right)f_{ctm} \\ f_{ctm}\end{cases} : \text{dans les autres cas,} \end{cases} \quad \textbf{(3.23)}$$

h = hauteur de la section droite en mm,

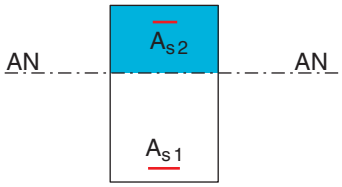
16. EC 2 – 9.2.1.1 (1) + voir AN
17. EC 2 – 7.1 (2)

b_t = largeur moyenne de la zone tendue :



A_{s1} comprenant les armatures de peau éventuelles (voir § 10, chapitre 4 : « Dispositions constructives »).

En dehors des zones de recouvrement, il faut vérifier[18] :[19]



$\boxed{A_{s1} \text{ et } A_{s2} \leq 0{,}04.A_c}$ valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française,

A_c = aire de la section transversale de béton.

Lorsque la maîtrise de la fissuration est requise, la section effective des armatures longitudinales de traction ne doit pas être inférieure à la section nécessaire au contrôle de la fissuration (voir § 3.1, chapitre 4 : « État limite de service de fissuration[20] », *Maîtrise de l'eurocode 2*, J. Roux, Éditions Eyrolles, 2009). Un calcul plus rigoureux que la formule recommandée par les Règles EC 2, pour les sections rectangulaire et en T, est donnée ci-dessous.

2.3.2 Cas où la maîtrise de la fissuration est requise – Calcul rigoureux

Condition de non-fragilité : la sollicitation provoquant la fissuration du béton ($\sigma_t = f_{ctm}$) de la section supposée non armée et non fissurée doit entraîner dans les aciers tendus de la section réelle une contrainte au plus égale à f_{yk}[21].

Le diagramme des contraintes est supposé linéaire.

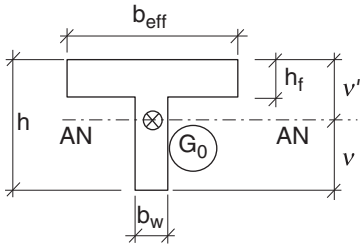
Le point de passage de la résultante des contraintes normales est supposé identique à celui de la sollicitation de service la plus défavorable.

2.3.2.1 Cas des sections en T

On suppose que le signe du moment M_{G_0} est tel que la table soit comprimée.

18. EC 2 – 9.2.1.1 (3)
19. EC 2 – voir AN
20. EC 2 – 9.2.1.1 (1)
21. EC 2 – 7.3.2 (1)P

Caractéristiques géométriques de la section non fissurée et non armée :



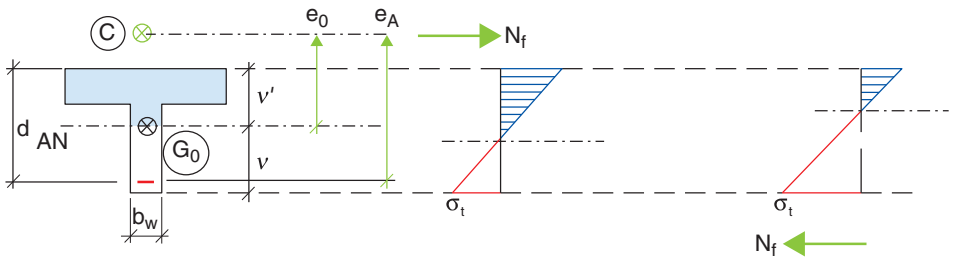
$$A_c = b_w.h + (b_{eff} - b_w)h_f$$

$$v' = \frac{b_w.h^2 + (b_{eff} - b_w)h_f^2}{2.A_c}$$

$$v = h - v'$$

$$I = b_w \frac{h^3}{3} + (b_{eff} - b_w)\frac{h_f^3}{3} - A_c.v'^2$$

Les excentricités e_0 et e_A ont le même signe que N_{ser} (et que l'effort normal N_f provoquant la fissuration de la section), ce signe a été précisé au § 1.1. Nous avons, lorsque $M_{G_0} > 0$:



cas où $N_f > 0$

$$\sigma_t = \frac{N_f}{A_c} - \frac{N_f.e_0.v}{I}$$

avec :

$N_f > 0$

$e_0 > 0$ (même signe que N_{ser})

cas où $N_f < 0$

$$\sigma_t = \frac{N_f}{A_c} - \frac{N_f.e_0.v}{I}$$

avec :

$N_f < 0$

$e_0 < 0$ (même signe que N_{ser})

D'où, dans tous les cas :

$$\left.\begin{array}{l} \sigma_t = \dfrac{N_f}{A_c} - \dfrac{N_f.e_0.v}{I} \\ e_0 = \left(\dfrac{M_{serG_0}}{N_{ser}}\right)_{max} \\ \sigma_t = -f_{ctm} \end{array}\right\} \Rightarrow \left\{\begin{array}{l} N_f = \dfrac{A_c.I.f_{ctm}}{A_c.e_0.v - I} \\ \rho = \dfrac{I}{A_c.v.v'} = \text{rendement de la section} \end{array}\right.$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{N_f = \frac{\rho.v'}{e_0 - \rho.v'} A_c.f_{ctm}}$$

en remarquant que :

$$\sigma_t = \frac{N_f}{A_c} - \frac{N_f.e_0.v}{I} > 0 \Rightarrow \frac{1}{A_c} - \frac{e_c.v}{I} > 0$$

$$\Rightarrow e_0 < \frac{I}{A_c.v} = \rho.v' \text{ (limite supérieure du noyau central).}$$

D'où les cas à considérer :

1/ cas où $e_0 > 0$ (N_{ser} est une compression) :

a) si $0 < e_0 \leq \rho.v'$, la section est entièrement comprimée : la condition de non-fragilité n'intervient pas et il faut prévoir, pour la section totale des armatures, la valeur minimale requise pour les pièces comprimées (voir § 4.3) ;

b) si $e_0 > \rho.v'$, la section est partiellement tendue et on détermine $A_{s,\,min}$ en écrivant que pour N_f excentré de e_0, la contrainte des aciers tendus atteint la limite d'élasticité, soit :

$$\left.\begin{array}{l} A_{s,\,min} = \dfrac{N_f.e_A}{z_c.f_{yk}} - \dfrac{N_f}{f_{yk}} \\ z_c = 0{,}9.d \\ e_A = e_0 + (d - v') \end{array}\right\} \Rightarrow \quad A_{s,\,min} = \frac{N_f}{f_{yk}}\left[\frac{e_A}{z_c} - 1\right] = \frac{N_f}{f_{yk}} . \frac{e_0 - v' + 0{,}1.d}{0{,}9.d}$$

$$\boxed{A_{s,\,min} = A_c \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} . \frac{I}{0{,}9.d} . \frac{e_0 - v' + 0{,}1.d}{A_c.e_0.v - I}} \text{ avec } e_0 \text{ de même signe que } N_{ser}.$$

$A_{s,\,min}$ est positif et n'a donc de sens que si $e_A \geq z_c$ ou $e_0 \geq v' - 0{,}1.d$.

Dans le cas contraire, on pourrait, théoriquement, prendre $A_{s,\,min} = 0$.

2/ cas où $e_0 < 0$ (N_{ser} est une traction) :

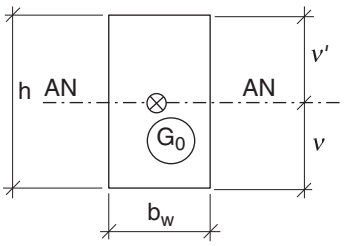
a) si $e_0 \leq -(d - v')$, la section est partiellement tendue : on se ramène donc au cas 1.b ci-dessus avec $e_0 < 0$;

b) si $-(d - v') \leq e_0 < 0$, la section est entièrement tendue : il faut prévoir deux nappes d'armatures tendues. On applique les formules du § 3.3.

Sous moment négatif, il suffit d'intervertir *v* et *v'* dans les formules précédentes, tout en conservant la convention : l'excentricité e_0 a le même signe que N_{ser}.

2.3.2.2 Cas des sections rectangulaires

• Caractéristiques géométriques de la section non fissurée et non armée :



$$A_c = b_w.h$$

$$v = v' = \frac{h}{2}$$

$$I = \frac{b_w.h^3}{12}$$

$$\rho = \frac{I}{A_c.v.v'} = \frac{\frac{b_w.h^3}{12}}{b_w.h\left(\frac{h}{2}\right)^2} = \frac{1}{3}$$

• Section minimale d'armatures :

Les formules établies pour les sections en T partiellement tendues s'écrivent :

$$N_f = \frac{\rho.v'}{e_0 - \rho.v'} A_c.f_{ctm} = \frac{\frac{1}{3}.\frac{h}{2}}{e_0 - \frac{1}{3}.\frac{h}{2}} b_w.h.f_{ctm} = \frac{1}{6}.\frac{h}{e_0 - \frac{h}{6}} b_w.h.f_{ctm}$$

d'où :

$$A_{s,\,min} = \frac{N_f}{f_{yk}}.\frac{e_0 - v' + 0{,}1.d}{0{,}9.d} = \frac{1}{6}.\frac{h}{e_0 - \frac{h}{6}} b_w.h.\frac{f_{ctm}}{f_{yk}}.\frac{e_0 - 0{,}5.h + 0{,}1.d}{0{,}9.d}$$

$$A_{s,\,min} = \frac{1}{6} b_w.h.\frac{f_{ctm}}{f_{yk}}.\frac{h}{e_0 - \frac{h}{6}}.\frac{e_0 - 0{,}5.h + 0{,}1.d}{0{,}9.d}$$

soit en admettant que $d \approx 0{,}9.h$:

$$A_{s,\,min} = b_w.d\,\frac{f_{ctm}}{f_{yk}}\underbrace{\left(\frac{1}{6.0{,}9^3}\right)}_{0{,}23}\frac{e_0 - \frac{0{,}5}{0{,}9}\,d + 0{,}1.d}{e_0 - \frac{d}{6.0{,}9}}$$

$$\boxed{A_{s,\,min} = 0{,}23\frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_w.d\frac{e_0 - 0{,}45.d}{e_0 - 0{,}185.d}}$$ avec e_0 de même signe que N_{ser}.

Remarques

Dans le cas de la flexion simple (N = 0) :

si e_0 tend vers l'infini, $A_{s,\,min} \rightarrow 0{,}23\frac{f_{ctm}}{f_{yk}}b_w.d$

et on retrouve sensiblement la section minimale en flexion simple (voir § 7, chapitre 7 : « Flexion simple »).

Dans le cas de la traction simple (M = 0) :

si e_0 tend vers zéro :

$$A_{s,\,min} \rightarrow 0{,}23\frac{f_{ctm}}{f_{yk}}b_w\,(0{,}9.h)\frac{0{,}45.d}{0{,}185.d} = 0{,}504\frac{f_{ctm}}{f_{yk}}b_w.h$$

et comme $A_{s,\,min}$ est la section d'une seule nappe d'aciers, on retrouve bien pour les deux nappes, la section minimale en traction simple (voir § 5.1, chapitre 5 : « Traction simple ») :

$$A_{s,\,min} = A_c\frac{f_{ctm}}{f_{yk}}$$

2.4 Calcul des contraintes à l'ELS

2.4.1 Introduction

La section est supposée non fissurée tant que la contrainte de traction en flexion n'excède pas $f_{ct,\,eff}$ ou f_{ctm}, cette contrainte étant identique à celle utilisée pour le calcul de la section minimale d'armatures[22] (voir § 2.3).

Dans les cas courants ($f_{ck} \leq 50$ MPa et aciers S 500), la vérification des contraintes à l'ELS en considérant la section non fissurée est inutile car :

- même si cette section est soumise à de faibles moments fléchissants, elle comporte une section minimale d'armatures supérieure à la section d'aciers tendus strictement nécessaire ;
- les contraintes calculées en considérant la section fissurée sont plus élevées que celles obtenues pour la section non fissurée.

Le § 2.4.2 qui suit n'est donc donné qu'à titre indicatif.

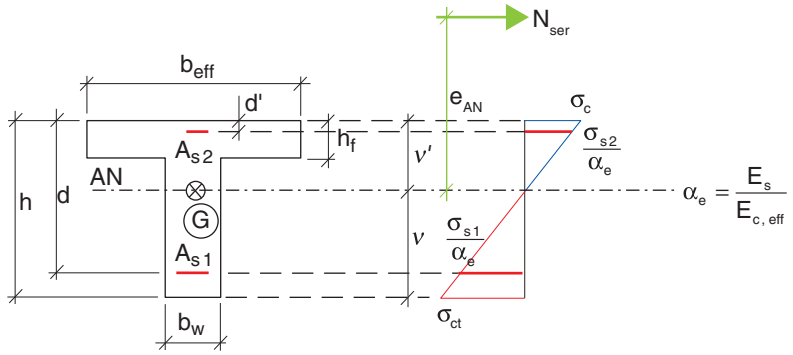
2.4.2 Contraintes dans la section non fissurée

2.4.2.1 Cas des sections en T

On suppose que le signe du moment M_{G_0} est tel que la table soit comprimée.

22. EC 2 – 7.1 (2)

• Caractéristiques géométriques :



$$A_{ch} = b_w.h + (b_{eff} - b_w)h_f + \alpha_e (A_{s1} + A_{s2})$$

$$v' = \frac{\frac{b_w.h^2}{2} + \frac{(b_{eff} - b_w)h_f^2}{2} + \alpha_e (A_{s1}.d + A_{s2}.d')}{A_{ch}}$$

$$v = h - v'$$

$$I_{ch} = \frac{b_w.h^3}{3} + \frac{(b_{eff} - b_w)h_f^3}{3} + \alpha_e (A_{s1}.d^2 + A_{s2}.d'^2) - A_{ch}.v'^2$$

• Moment fléchissant par rapport à l'axe neutre :

– dans la section homogène (non fissurée) :

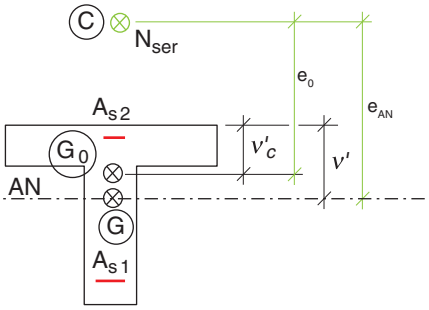
G = centre de gravité de la section,

v' = distance de G à la fibre la plus comprimée,

– Dans la section non armée et non fissurée (béton seul) :

G_0= centre de gravité de la section,

– distance de G_0 à la fibre la plus comprimée (voir § 2.3.2.1) :



$$v'_c = \frac{b_w.h^2 + (b_{eff} - b_w)h_f^2}{2(b_w.h + (b_{eff} - b_w)h_f)}$$

– Moment fléchissant par rapport à G :

$$M_{ser/AN} = N_{ser}.e_{AN} = N_{ser}(e_0 - v'_c + v')$$

avec e_0 de même signe que N_{ser} (voir § 2.3.2.1),

Contraintes :

$$\sigma_{ct} = \frac{N_{ser}}{A_{ch}} - \frac{M_{ser/AN}.v}{I_{ch}} \geq -f_{ct,\ eff}$$ sinon voir § 2.4.3, la section étant fissurée,

$$\sigma_c = \frac{N_{ser}}{A_{ch}} + \frac{M_{ser/AN}.v'}{I_{ch}} \leq \overline{\sigma_c}$$ pour les classes d'exposition XD, XF et XS,

$$\sigma_{s1} = \alpha_e \left[\frac{N_{ser}}{A_{ch}} - \frac{M_{ser/AN}\,(d - v')}{I_{ch}} \right] \geq -\overline{\sigma_s}$$

$$\sigma_{s2} = \alpha_e \left[\frac{N_{ser}}{A_{ch}} + \frac{M_{ser/AN}\,(v' - d')}{I_{ch}} \right]$$

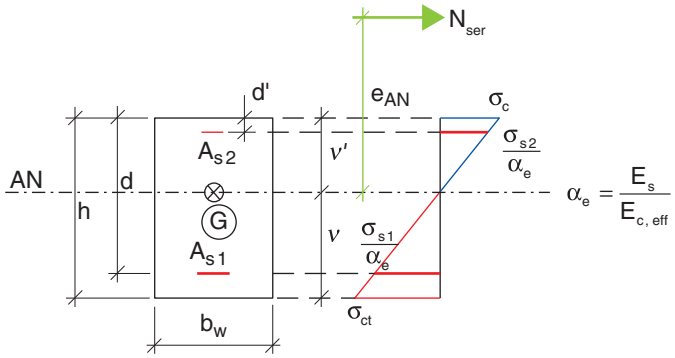
Remarque

Sous moment fléchissant négatif, les formules précédentes s'appliquent :

- en intervertissant :
  - σ_{ct} et σ_c,
  - σ_{s1} et σ_{s2},
- en interchangeant les vérifications sur les contraintes du béton d'une part et celles sur les contraintes des aciers d'autre part,
- en conservant la convention : l'excentricité e_0 a le même signe que N_{ser}.

2.4.2.2 Cas des sections rectangulaires

Caractéristiques géométriques :



$$A_{ch} = b_w.h + \alpha_e \left(A_{s1} + A_{s2} \right)$$

$$v' = \frac{\frac{b_w.h^2}{2} + \alpha_e \left(A_{s1}.d + A_{s2}.d' \right)}{A_{ch}}$$

$$v = h - v'$$

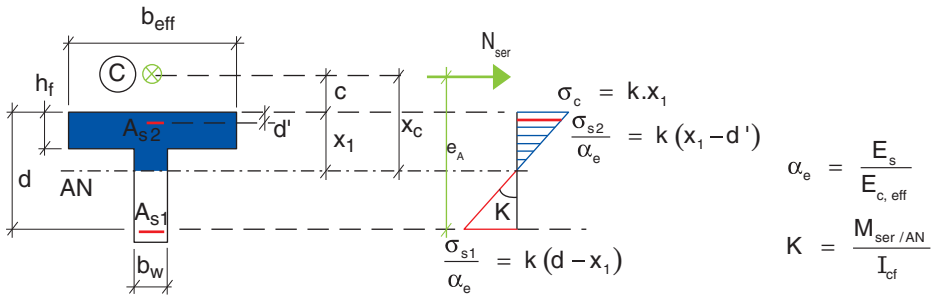
$$I_{ch} = \frac{b_w.h^3}{3} + \alpha_e \left(A_{s1}.d^2 + A_{s2}.d'^2 \right) - A_{ch}.v'^2$$

$$v'_c = \frac{h}{2}$$

Moment fléchissant par rapport à l'axe neutre et contraintes : comme indiqué au § 2.4.2.1.

2.4.3 Contraintes dans la section fissurée

2.4.3.1 Cas de la section en T



On pose :

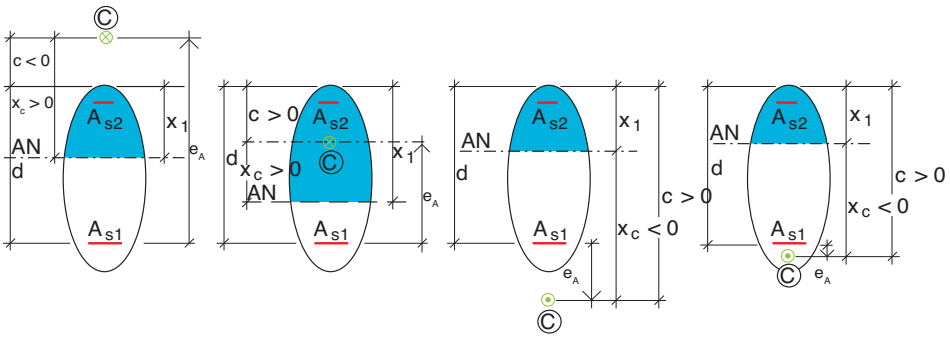
x_1 = distance, toujours positive, de la fibre la plus comprimée de la section à l'axe neutre,

x_c = distance du centre de pression C à l'axe neutre, de même signe que N_{ser},

e_A = distance du centre de gravité des aciers tendus au centre de pression C, de même signe que N_{ser},

c = distance de la fibre la plus comprimée de la section au centre de pression C : $c = d - e_A$:

- si $N_{ser} > 0$ et $e_A > d$ (C est à l'extérieur de la section), on a $c < 0$;
- si $N_{ser} > 0$ et $e_A < d$ (C est à l'intérieur de la section), on a $c > 0$;
- si $N_{ser} < 0$ (C peut être à l'intérieur ou à l'extérieur de la section), on a toujours $c > 0$.



Compression	**Compression**	**Traction**	**Traction**
$N_{ser} > 0$	$N_{ser} > 0$	$N_{ser} < 0$	$N_{ser} < 0$
$x_c > 0$	$x_c > 0$	$x_c < 0$	$x_c < 0$
$e_A > 0$	$e_A > 0$	$e_A < 0$	$e_A < 0$
$c < 0$	$c > 0$	$c > 0$	$c > 0$

Dans tous les cas : $x_1 = x_c + c$

Position de l'axe neutre :

Section	$\frac{N}{K}$	$z_{/C}$	$M_{/C}$
$b_{eff}.x_1$	$\frac{1}{2}b_{eff}.x_1^2$	$\frac{x_1}{3} - c$	$\frac{1}{2}b_{eff}(x_c + c)^2\left[\frac{x_c + c}{3} - c\right]$
À déduire	$-\frac{1}{2}(b_{eff} - b_w)(x_1 - h_f)^2$	$\frac{x_1 - h_f}{3} + h_f - c$	$-\frac{b_{eff} - b_w}{2}(x_c + c - h_f)^2\left[\frac{x_c + c + 2h_f}{3} - c\right]$
A_{s2}	$\alpha_e.A_{s2}(x_1 - d')$	$d' - c$	$\alpha_e.A_{s2}(x_c + c - d').(d' - c)$
A_{s1}	$-\alpha_e.A_{s1}(d - x_1)$	$d - c$	$\alpha_e.A_{s1}(x_c + c - d).(d - c)$
	$\sum_1 = \frac{N}{K}$		$\sum_2 = M_{/C} = 0$

En écrivant $\sum_2 = M_{/C} = 0$, on obtient une équation du troisième degré en x_c :

$$M_{/C} = \frac{1}{2}b_{eff}(x_c + c)^2\left[\frac{x_c + c}{3} - c\right] - \frac{b_{eff} - b_w}{2}(x_c + c - h_f)^2\frac{x_c - 2c + 2h_f}{3}$$

$$+ \alpha_e.A_{s2}(x_c + c - d').(d' - c) + \alpha_e.A_{s1}(x_c + c - d).(d - c) = 0$$

En développant les carrés :

$$\frac{1}{6}b_{eff}\left[x_c^2 + 2.c.x_c + c^2\right].\left[x_c - 2c\right] - \frac{b_{eff} - b_w}{6}\left[x_c^2 + 2(c - h_f)x_c + (c - h_f)^2\right]$$

$$.\left[x_c - 2(c - h_f)\right] + \alpha_e.A_{s2}\left[x_c - (d' - c)\right].\left[d' - c\right] + \alpha_e.A_{s1}\left[x_c - (d - c)\right].\left[d - c\right] = 0$$

soit en effectuant :

$$\frac{1}{6}b_{eff}.x_c^3 - \frac{1}{2}b_{eff}.c^2.x_c - \frac{1}{3}b_{eff}.c^3 - \frac{b_{eff}-b_w}{6}x_c^3 + \frac{b_{eff}-b_w}{2}(c-h_f)^2.x_c$$

$$+\frac{b_{eff}-b_w}{3}(c-h_f)^3 + \alpha_e.A_{s2}.x_c(d'-c) - \alpha_e.A_{s2}(d'-c)^2 + \alpha_e.A_{s1}.x_c(d-c)$$

$$-\alpha_e.A_{s1}(d-c)^2 = 0$$

en regroupant et en ordonnant par rapport aux puissances décroissantes de x_c :

$$x_c^3\left[\frac{b_{eff}}{6} - \frac{b_{eff}-b_w}{6}\right] + x_c\left[-\frac{b_{eff}.c^2}{2} + \frac{(b_{eff}-b_w).(c-h_f)^2}{2} + \alpha_e.A_{s2}(d'-c)\right.$$

$$\left.+\alpha_e.A_{s1}(d-c)\right] + \left[-\frac{b_{eff}.c^3}{3} + \frac{(b_{eff}-b_w).(c-h_f)^3}{3} - \alpha_e.A_{s2}(d'-c)^2\right.$$

$$\left.-\alpha_e.A_{s1}(d-c)^2\right] = 0$$

d'où l'équation du troisième degré en x_c :

$$x_c^3 + p.x_c + q = 0$$

$$p = -3\frac{b_{eff}}{b_w}c^2 + 3\left(\frac{b_{eff}}{b_w} - 1\right).(c-h_f)^2 + \frac{6.\alpha_e.A_{s2}}{b_w}(d'-c) + \frac{6.\alpha_e.A_{s1}}{b_w}(d-c)$$

$$q = -2\frac{b_{eff}}{b_w}c^3 + 2\left(\frac{b_{eff}}{b_w} - 1\right).(c-h_f)^3 - \frac{6.\alpha_e.A_{s2}}{b_w}(d'-c)^2 - \frac{6.\alpha_e.A_{s1}}{b_w}(d-c)^2$$

La résolution de cette équation donne x_c :

$\Rightarrow \quad x_c \quad \Rightarrow \quad x_1 = x_c + c \geq h_f$ sinon, voir § 2.4.3.2 avec $b_w = b_{eff}$ (section rectangulaire de largeur b_{eff}).

Il faut vérifier que la section comporte bien une nappe d'aciers tendus, c'est-à-dire :

$x_1 = x_c + c \leq d$

Moment d'inertie :

$$I_{cf} = \frac{b_{eff}.x_1^3}{3} - \frac{(b_{eff}-b_w).(x_1-h_f)^3}{3} + \alpha_e.A_{s2}(x_1-d')^2 + \alpha_e.A_{s1}(d-x_1)^2$$

Calcul des contraintes :

En écrivant que le moment des forces internes par rapport à l'axe neutre vaut :

$M_{ser/AN} = N_{ser}.x_c$

il vient :

$$K = \frac{M_{ser/AN}}{I_{cf}} \Rightarrow \boxed{K = \frac{N_{ser}.x_c}{I_{cf}}}$$

Les contraintes valent alors :

$$\boxed{\sigma_c = K.x_1 \leq \overline{\sigma_c} \quad \text{pour les classes d'exposition XD, XF et XS}}$$

$$\boxed{\sigma_{s1} = \alpha_e.K\left(d - x_1\right) \leq \overline{\sigma_s}}$$

$$\sigma_{s2} = \alpha_e.K\left(x_1 - d'\right)$$

2.4.3.2 Cas de la section rectangulaire

Pour $b_{eff} = b_w$, les équations précédentes s'écrivent :

Position de l'axe neutre :

$$\boxed{\begin{aligned} &x_c^3 + p.x_c + q = 0 \\ &p = -3.c^2 + \frac{6.\alpha_e.A_{s2}}{b_w}(d' - c) + \frac{6.\alpha_e.A_{s1}}{b_w}(d - c) \\ &q = -2.c^3 - \frac{6.\alpha_e.A_{s2}}{b_w}(d' - c)^2 - \frac{6.\alpha_e.A_{s1}}{b_w}(d - c)^2 \end{aligned}} \Rightarrow \boxed{x_1 = x_c + c}$$

Il faut vérifier que la section comporte bien une nappe d'aciers tendus, c'est-à-dire :

$$x_1 = x_c + c \leq d$$

Moment d'inertie :

$$\boxed{I_{cf} = \frac{b_w.x_1^3}{3} + \alpha_e.A_{s2}\left(x_1 - d'\right)^2 + \alpha_e.A_{s1}\left(d - x_1\right)^2}$$

Calcul des contraintes :

$$K = \frac{M_{ser/AN}}{I_{cf}} \Rightarrow \boxed{K = \frac{N_{ser}.x_c}{I_{cf}}}$$

$$\boxed{\sigma_c = K.x_1 \leq \overline{\sigma_c} \quad \text{pour les classes d'exposition XD, XF et XS}}$$

$$\boxed{\sigma_{s1} = \alpha_e.K\left(d - x_1\right) \leq \overline{\sigma_s}}$$

$$\sigma_{s2} = \alpha_e.K\left(x_1 - d'\right)$$

2.4.3.3 Cas d'une section de forme quelconque

Se reporter à l'annexe 6 disponible en ligne sur www.editions-eyrolles sur la fiche de l'ouvrage[23].

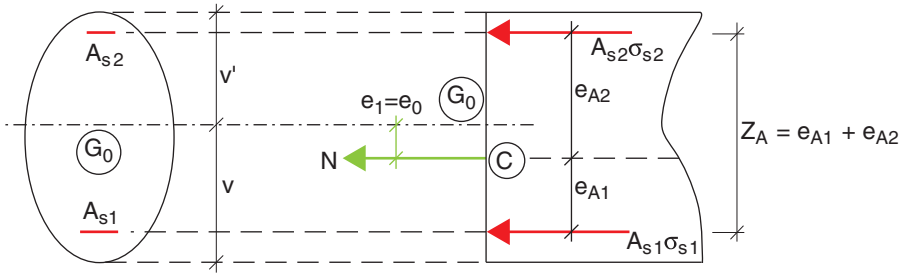
3. Sections entièrement tendues

3.1 Domaine d'application

À l'ELU comme à l'ELS, la section est entièrement tendue si :

$$\begin{cases} N \text{ est une traction } (N < 0), \\ C \text{ tombe entre les armatures.} \end{cases}$$

3.2 Calcul des armatures



L'équilibre des moments par rapport aux armatures donne :

$$A_{s1} = \frac{N.e_{A2}}{(e_{A1} + e_{A2})\sigma_{s1}}$$
$$A_{s2} = \frac{N.e_{A1}}{(e_{A1} + e_{A2})\sigma_{s2}}$$

Solution économique : avoir le centre de gravité des armatures en C, d'où :

- Calcul à l'ELU :

$$\text{Pivot A} \quad \Rightarrow \quad \sigma_{s1} = \sigma_{s2} = \begin{cases} f_{yd} : \text{diagramme } \sigma - \varepsilon \text{ à palier horizontal,} \\ \sigma_s(\varepsilon_{ud}) : \text{diagramme } \sigma - \varepsilon \text{ à palier incliné.} \end{cases}$$

23. [annexe 6]

- Calcul à l'ELS :

$$\sigma_{s1} = \sigma_{s2} = \overline{\sigma_s}\ .$$

3.3 Section minimale

Lorsque la maîtrise de la fissuration est requise, la section effective des armatures longitudinales de traction ne doit pas être inférieure à la section nécessaire au contrôle de la fissuration (voir § 3.1, chapitre 4 : « État limite de service de fissuration[24] », *Maîtrise de l'eurocode 2*, J. Roux, Éditions Eyrolles, 2009).

Dans les autres cas, on peut prendre une section minimale d'armatures obtenue de la façon suivante :

- lorsque $M_{G_0} > 0$, nous avons (voir § 2.3.2.1) :

$$\begin{cases} N_f = \dfrac{A_c.I.f_{ctm}}{A_c.e_0.v - I} = \dfrac{\rho.v'}{e_0 - \rho.v'} A_c.f_{ctm} \text{ avec } e_0 < 0 \\ \rho = \dfrac{I}{A_c.v.v'} = \text{rendement de la section } \left(\dfrac{1}{3} \text{ pour une section rectangulaire}\right) \end{cases}$$

- on détermine $A_{s,\,min}$ en écrivant que, pour N_f excentré de $e_0 = e_{0ser}$, la contrainte des aciers tendus atteint la limite d'élasticité. D'où les conditions à vérifier :

$$\boxed{\begin{aligned} A_{s1} \geq A_{s,\,min\,1} &= \frac{N_f.e_{A2}}{(e_{A1} + e_{A2})f_{yk}} \\ A_{s2} \geq A_{s,\,min\,2} &= \frac{N_f.e_{A1}}{(e_{A1} + e_{A2})f_{yk}} \end{aligned}}$$

Sous moment négatif, il suffit d'intervertir *v* et *v'* d'une part, puis A_{s1}, e_{A1} et A_{s2}, e_{s2} d'autre part dans les formules précédentes, tout en conservant la convention : $e_0 < 0$ lorsque N_{ser} est une traction. On remarquera que A_{s1} est la section la plus tendue dans tous les cas.

Remarque

Dans le cas de la traction simple :

$$\text{si } e_0 \to 0\,,\ N_f \to A_c.f_{ctm},\ A_{s,\,min1} + A_{s,\,min2} \to A_c \frac{f_{ctm}}{f_{yk}}$$

et on retrouve la section minimale en traction simple (voir § 5.1, chapitre 5 : « Traction simple »).

24. EC 2 – 9.2.1.1 (1)

3.4 Vérification des contraintes à l'ELS

Les formules permettant le calcul des armatures donnent à l'ELS :

$$\sigma_{s1} = \frac{N_{ser}.e_{A2}}{(e_{A1} + e_{A2})A_{s1}}$$

$$\sigma_{s2} = \frac{N_{ser}.e_{A1}}{(e_{A1} + e_{A2})A_{s2}}$$

Il faut vérifier :

$$\sigma_s = \text{Max}\begin{cases}\sigma_{s1} \\ \sigma_{s2}\end{cases} \leq \overline{\sigma_s}$$

4. Sections entièrement comprimées

4.1 Domaine d'application

La section est entièrement comprimée si la section A_{s2} des armatures les plus comprimées étant supposée connue (en cas contraire, faire $A_{s2} = 0$ dans les formules qui suivent), on vérifie les conditions ci-après.

4.1.1 À l'ELS

$$\begin{cases} N_{ser} \text{ est une compression } (N_{ser} > 0), \\ M_{serA} - A_{s2}.\sigma_{s2}(d - d') > \frac{1}{2}.\frac{h}{d}\left(1 - \frac{1}{3}.\frac{h}{d}\right) b_w.d^2.\overline{\sigma_c} \text{ pour une section rectangulaire} \\ \text{avec : } \sigma_{s2} = \alpha_e.\overline{\sigma_c}\,\frac{h - d'}{h} \end{cases}$$

Remarque

Pour une section de forme quelconque, il faut vérifier :

$$-\frac{I}{A.v'} = -\rho.v \leq e_G = \frac{M_{serG}}{N_{ser}} \leq \rho.v' = \frac{I}{A.v}$$

avec :

I, A, v et v' = caractéristiques géométriques de la section de béton seul de centre de gravité G lorsque l'on ne connaît pas la section des armatures longitudinales,

$I = I_{ch}$ et $A = A_{ch}$ caractéristiques géométriques de la section de béton homogène lorsque l'on connaît la section des armatures longitudinales.

4.1.2 À l'ELU

$$\begin{cases} N_{Ed} \text{ est une compression } (N_{Ed} > 0), \\ M_{EdA} - A_{s2}.f_{yd}(d - d') > M_{BC} = \lambda \dfrac{h}{d}\left(1 - \dfrac{\lambda}{2}.\dfrac{h}{d}\right) b_w.d^2.f_{cu} \text{ pour une section rectangulaire} \end{cases}$$

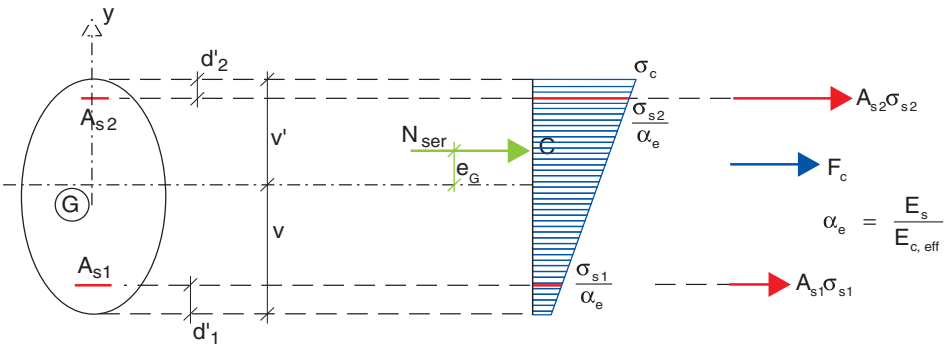
4.2 Calcul des armatures

4.2.1 Dimensionnement à l'ELU

Calcul manuel au pivot C compliqué, on utilise des abaques (diagrammes d'interaction), voir § 5.

Voir aussi chapitre 3 : « Instabilité de forme – Flambement », *Maîtrise de l'eurocode 2*, J. Roux, Éditions Eyrolles, 2009.

4.2.2 Dimensionnement à l'ELS



On désigne par :

$M_{serG} = N_{ser}.e_G =$ moment au centre de gravité G de la section homogène,

A_{s1} et $A_{s2} =$ sections d'aciers comprimés (fixées en satisfaisant la section minimale en compression simple du § 4.3).

Les caractéristiques géométriques de la section homogène sont :

$A_{ch} = A_c + \alpha_e (A_{s1} + A_{s2})$,

I_{ch} = moment d'inertie de la section A_{ch} par rapport à *G*.

On obtient la contrainte maximale du béton :

$$(\sigma_c)_{max} = \frac{N_{ser}}{A_{ch}} + \frac{M_{serG}.v'}{I_{ch}} \leq \overline{\sigma_c}$$

Pour le dimensionnement, il faut se fixer a priori A_{s2} et A_{s2}, et chercher par tâtonnements :

1/ à ce que C reste dans le noyau central

$$\left(-\frac{I_{ch}}{A_{ch}.v'} = -\rho.v \le e_G = \frac{M_{serG}}{N_{ser}} \le \rho.v' = \frac{I_{ch}}{A_{ch}.v} \right);$$

2/ à ce que $(\sigma_c)_{max} \le \overline{\sigma_c} = k_1.f_{ck}$ avec $(\sigma_c)_{max} \approx \overline{\sigma_c}$.

4.3 Sections extrêmes

On doit vérifier (valeurs recommandées et à utiliser pour l'Annexe nationale française[25]) :

$$A_{s,\,min} \le A_s \le A_{s,\,max}$$

$$A_{s,\,min} = \frac{0,10.N_{Ed}}{f_{yd}} \not< 0,002.A_c = 0,2\frac{A_c}{100} \qquad \textbf{(9.12N)}$$

$$A_{s,\,max} = \begin{cases} 0,04.A_c = 4\dfrac{A_c}{100} : \text{hors recouvrement,} \\ 0,08.A_c = 8\dfrac{A_c}{100} : \text{zone de recouvrement.} \end{cases}$$

avec :

N_{Ed} = effort normal agissant de compression,
A_c = aire de la section transversale de béton,

$f_{yd} = \dfrac{f_{yk}}{\gamma_s}$ = limite d'élasticité de calcul des armatures.

Si $A_s > A_{s,\,max}$ (y compris en zone de recouvrement), il faut revoir le coffrage.

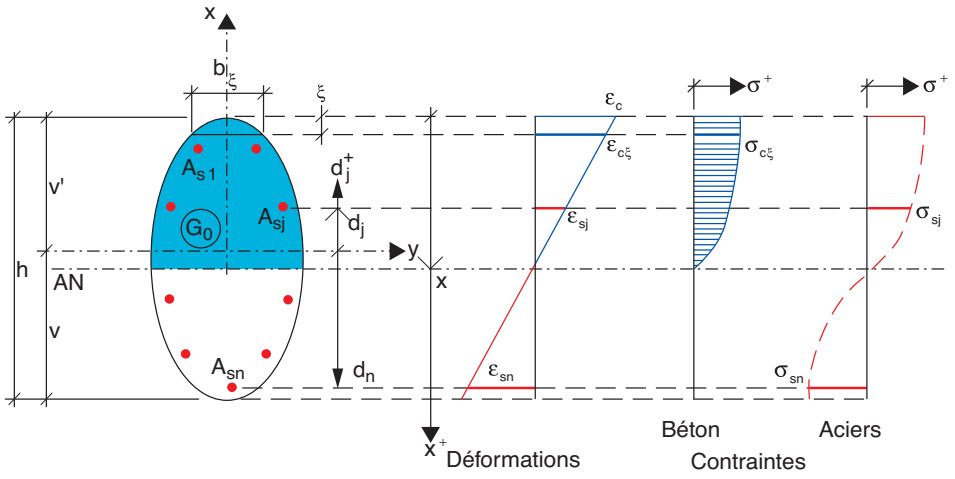
5. Diagrammes d'interaction

Les diagrammes d'interaction moment-effort normal sont des abaques permettant un dimensionnement ou une vérification rapide de sections droites dont la forme et la distribution des armatures sont fixées à l'avance.

Les diagrammes d'interaction sont établis uniquement pour l'état limite ultime (rien n'empêche d'en établir à l'ELS sur le même principe).

25. EC 2 – 9.5.2 (2) & (3)

5.1 Équations



Section quelconque à plan moyen, munie d'armatures respectant la symétrie :

G_0 = centre de gravité de la section de béton seul,

G_0x = axe situé dans le plan de symétrie,

G_0y = axe normal au plan de symétrie,

d_j = distance de l'axe G_0y à l'armature de section A_{sj}, comptée positivement dans le sens ascendant,

A_{sn} = armature la plus éloignée de la fibre la plus comprimée,

A_c = aire de la section de béton seul,

v' et v = distances de G_0y aux fibres extrêmes, respectivement comprimée et tendue, de la section.

Dans le cas d'une flexion de sens déterminé (comprimant par exemple la fibre supérieure de la section) et pour une valeur de x, fixant la position de l'axe neutre et prise arbitrairement, nous avons :

1/ un diagramme des déformations passant par le pivot associé à x

$x \leq \alpha_{AB}\left(v' - d_n\right)$ $\Rightarrow$ Pivot A,

$\alpha_{AB}\left(v' - d_n\right) < x \leq h$ $\Rightarrow$ Pivot B,

$x > h$ $\Rightarrow$ Pivot C,

avec :

$\varepsilon_{c\xi}$ = raccourcissement de la fibre de béton à la profondeur ξ,

ε_{sj} = déformation de l'armature A_{sj},

2/ un diagramme des contraintes dans le béton et dans l'acier, avec les conventions de signes précisées sur la figure ci-devant, donnant les contraintes :

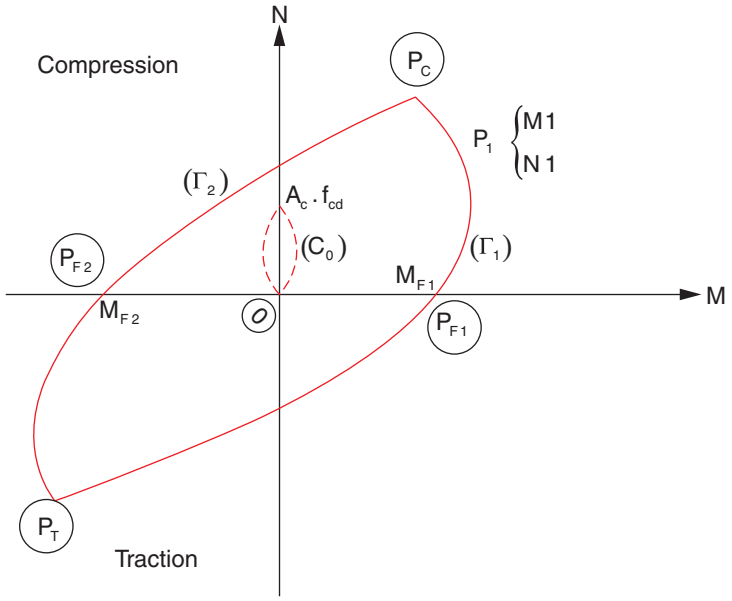
$\sigma_{c\xi}$ pour la fibre de béton à la profondeur ξ,

σ_{sj} pour l'armature A_{sj}.

La résultante et le moment résultant en G_0 des forces internes sont obtenus par les relations suivantes :

$$\begin{cases} N_1(x) = N_i = \int_0^x b_\xi . \sigma_{c\xi} . d\xi + \sum_1^n A_{sj} . \sigma_{sj} \\ M_1(x) = M_{iG_0} = \int_0^x b_\xi . \sigma_{c\xi} (v' - \xi) . d\xi + \sum_1^n A_{sj} . \sigma_{sj} . d_j \end{cases}$$

Dans le repère orthonormé plan (OM, ON), le point P_1 de coordonnées $M_1(x)$ et $N_1(x)$ décrit, lorsque x varie de $-\infty$ à $+\infty$, un arc de courbe généralement convexe (Γ_1), appelé courbe d'interaction.



5.2 Discussion

5.2.1 Cas où x est égal à moins l'infini

Le diagramme des déformations est constitué par la verticale du pivot A. On est donc en traction simple.

Le point correspondant de la courbe d'interaction est le point P_T défini par :

$$\begin{cases} M_1(-\infty) = M_T = \sum_1^n A_{sj}.\sigma_{sj}.d_j = -\sigma_s \sum_1^n A_{sj}.d_j \\ N_1(-\infty) = N_T = \sum_1^n A_{sj}.\sigma_{sj} = -\sigma_s \sum_1^n A_{sj} \end{cases}$$

avec : $\forall\ j : \sigma_{sj} = \sigma_s = \begin{cases} f_{yd} : \text{diagramme } \sigma - \varepsilon \text{ à palier horizontal,} \\ \sigma_s(\varepsilon_{ud}) : \text{diagramme } \sigma - \varepsilon \text{ à palier incliné.} \end{cases}$

On remarque que :

$$M_1(-\infty) = M_T = 0 \quad \Rightarrow \quad \sum_1^n A_{sj}.d_j = 0$$

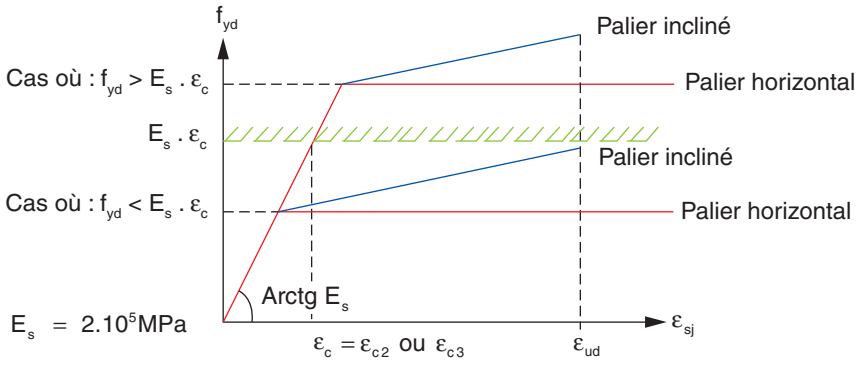
$\Rightarrow$ G_0 = centre de gravité des armatures A_{sj}.

5.2.2 Cas où x est égal à plus l'infini

Le diagramme des déformations est constitué par la verticale du pivot C. On est donc en compression simple.

$$\begin{cases} \varepsilon_{sj} = \varepsilon_c = \varepsilon_{c2} \text{ ou } \varepsilon_{c3} \\ \sigma_{c\xi} = f_{cd} \forall \xi \end{cases}$$

$$\Rightarrow \quad \forall\ j : \sigma_{sj} = \sigma_s = \begin{cases} \text{Min} \begin{cases} f_{yd} \\ E_s.\varepsilon_c \end{cases} : \text{diagramme } \sigma - \varepsilon \text{ à palier horizontal,} \\ \text{Min} \begin{cases} \sigma_s(\varepsilon_c) \\ E_s.\varepsilon_c \end{cases} : \text{diagramme } \sigma - \varepsilon \text{ à palier incliné.} \end{cases}$$



Le point correspondant de la courbe d'interaction est le point P_C défini par :

$$\begin{cases} M_1(+\infty) = M_C = \sigma_s \sum_1^n A_{sj}.d_j \\ N_1(+\infty) = N_C = A_c.f_{cd} + \sigma_s \sum_1^n A_{sj} \end{cases}$$

On remarque que :

$$M_1(+\infty) = M_C = 0 \quad \Rightarrow \quad \sum_1^n A_{sj}.d_j = 0$$

$\Rightarrow$ G_0 = centre de gravité des armatures A_{sj}

5.2.3 Cas où $N_i = 0$

Pour une certaine position de l'axe neutre, définie par x_{F1}, le point P_1 occupe sur (Γ_1) la position P_{F1} définie par :

$$\begin{cases} M_1(x_{F1}) = M_{F1} \\ N_1(x_{F1}) = 0 \end{cases}$$

On est alors en flexion simple correspondant au sens de flexion considéré.

5.2.4 Cas de la flexion inverse

En changeant le sens des moments, on décrit l'arc de courbe (Γ_2) limité par les points P_T et P_C.

Pour une certaine position de l'axe neutre définie par x_{F2}, le point représentatif occupe sur (Γ_2) la position P_{F2} définie par (bras de levier $v - \xi$ au lieu de $v' - \xi$) :

$$\begin{cases} M_2(x_{F2}) = M_{F2} \text{ de sens contraire à } M_{F1} \\ N_2(x_{F2}) = 0 \end{cases}$$

5.3 Courbe d'interaction

L'ensemble des deux courbes (Γ_1) et (Γ_2) constitue un contour continu et fermé (C_ρ) appelé courbe d'interaction.

Si la section présente un centre de symétrie :

- les points P_T et P_C sont situés sur l'axe ON ;
- les deux courbes (Γ_1) et (Γ_2) sont symétriques par rapport à cet axe.

Le contour fermé (C_ρ) constitue la frontière du « domaine de securité » de la section étudiée, munie de ses armatures de section totale $\sum A_{sj}$. Le point représentatif de la sollicitation ultime agissante (de coordonnées M_{EdG_0}, N_{Ed}) doit se trouver à l'intérieur ou sur la frontière du domaine de sécurité.

Si la section ne comporte aucune armature :

$$A_{sj} = 0 \quad \forall\, j \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} P_T = \begin{cases} M_T = 0 \\ N_T = 0 \end{cases} \\ P_C = \begin{cases} M_C = 0 \\ N_C = A_c.f_{cd} \end{cases} \end{cases}$$

En faisant varier *x*, on obtient le contour (C_0) définissant le domaine de sécurité « lenticulaire » de la section sans armatures. En fait, un pourcentage minimal d'armatures est toujours exigé (voir § 2.3, 3.3 & 4.3).

5.4 Tracé des diagrammes d'interaction

Pour une section donnée (béton, armatures, position des aciers), on définit, à partir des efforts internes N_i et M_{iG_0} calculés au § 5.1, les quantités sans dimension :

$\nu = \dfrac{N_i}{A_c.f_{cd}}$: effort normal réduit,

A_c = aire totale de la section de béton seul,

$\mu = \dfrac{M_{iG_0}}{A_c.h.f_{cd}}$: moment fléchissant réduit en G_0,

h = hauteur totale de la section dans le plan de flexion,

$\rho = \dfrac{\left(\sum A_{sj}\right) f_{yd}}{A_c.f_{cd}}$: pourcentage mécanique d'armatures.

Pour une position fixée des armatures à l'intérieur de la section, si l'on fait varier ρ par pas de 0,1 par exemple (ρ = 0 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,3…), on obtient, dans le repère orthonormé réduit (μ, ν), un réseau de courbes C_ρ (C_0, C_1, C_2, C_3…) appelé diagramme d'interaction.

5.5 Propriétés des diagrammes d'interaction

Les valeurs de ρ sont uniformément réparties (intervalle constant entre deux valeurs successives) suivant les droites « rayonnantes » correspondant à

x = Cste (c'est-à-dire à un couple donné de déformations ε_c, ε_{sn} constant). Il convient donc de conduire les interpolations dans les directions de ces droites.

Pour la section sans armatures on a[26] :

$$A_{sj} = 0\ \forall\ j \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} P_T = \begin{cases} M_T = -\sigma_s \sum A_{sj}.d_j = 0 \quad \Rightarrow \quad \mu = 0 \\ N_T = -\sigma_s \sum A_{sj} = 0 \quad \Rightarrow \quad \nu = 0 \end{cases} \\ P_C = \begin{cases} M_C = \sigma_s \sum A_{sj}.d_j = 0 \quad \Rightarrow \quad \mu = 0 \\ N_C = A_c.f_{cd} + \sigma_s \sum A_{sj} = A_c.f_{cd} \quad \Rightarrow \quad \nu = 1 \end{cases} \end{cases} \qquad 27$$

Pour une section donnée, avec une position des armatures fixée, les diagrammes d'interaction sont établis, par ordinateur, en faisant varier proportionnellement toutes les sections A_{sj} des armatures :

$$\sum_j k.A_{sj} = k.\sum_j A_{sj}$$

D'où les coordonnées des points P_T et P_C vérifient :

• pour P_T :

$$\begin{cases} M_T = -\sigma_s \sum A_{sj}.d_j \\ N_T = -\sigma_s \sum A_{sj} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \mu = -\dfrac{\sigma_s}{A_c.h.f_{cd}} \sum A_{sj}.d_j \\ \nu = -\dfrac{\sigma_s}{A_c.f_{cd}} \sum A_{sj} \end{cases} \Rightarrow \frac{\mu}{\nu} = \frac{\sum A_{sj}.d_j}{h.\sum A_{sj}} = k$$

et le point P_T se déplace sur une droite (Δ_T) passant par le point P_{T0} de coordonnées (0, 0) et de pente k dans le repère (μ,ν) ;

• pour P_C :

$$\begin{cases} M_C = \sigma_s \sum A_{sj}.d_j \\ N_C = A_c.f_{cd} + \sigma_s \sum A_{sj} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \mu = \dfrac{\sigma_s}{A_c.h.f_{cd}} \sum A_{sj}.d_j \\ \nu = \dfrac{A_c.f_{cd} + \sigma_s \sum A_{sj}}{A_c.f_{cd}} = 1 + \dfrac{\sigma_s \sum A_{sj}}{A_c.f_{cd}} \end{cases}$$

d'où :

$\frac{\mu}{\nu - 1} = \frac{\sum A_{sj}.d_j}{h.\sum A_{sj}} = k$ et le point P_C se déplace sur une droite (Δ_C) passant par le point P_{C0} de coordonnées (0, 1) et de pente k dans le repère (μ,ν),

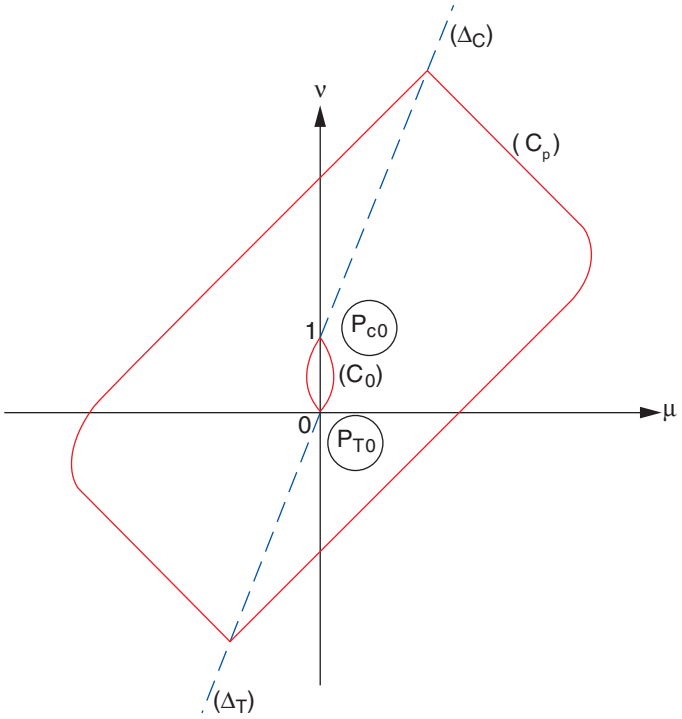
26. Voir § 5.2.1 ∀j
27. Voir § 5.2.2

Remarque

Les valeurs de σ_s figurant dans les expressions précédentes sont celles indiquées :

– au § 5.2.1 pour le point P_T associé à la traction simple ;

– au § 5.2.2 pour le point P_C associé à la compression simple.



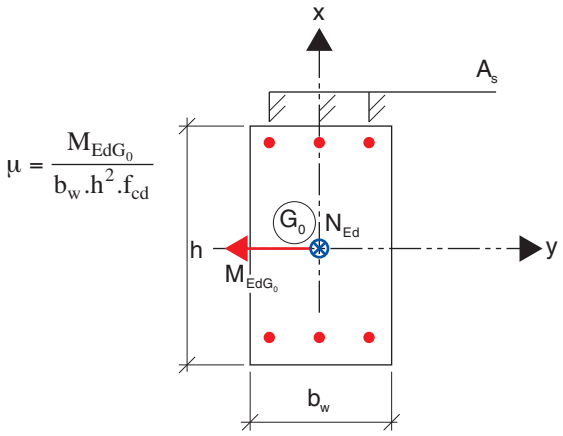
5.6 Application à la détermination des armatures pour les sections rectangulaires

5.6.1 Données

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \text{ et } f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s},$$

N_{Ed} et M_{EdG_0} ($M_{EdG_0} = N_{Ed}\left(e_1 + e_i + \Delta e_0\right)$ si N_{Ed} est une compression, comme indiqué au § 1.2).

b_w et h

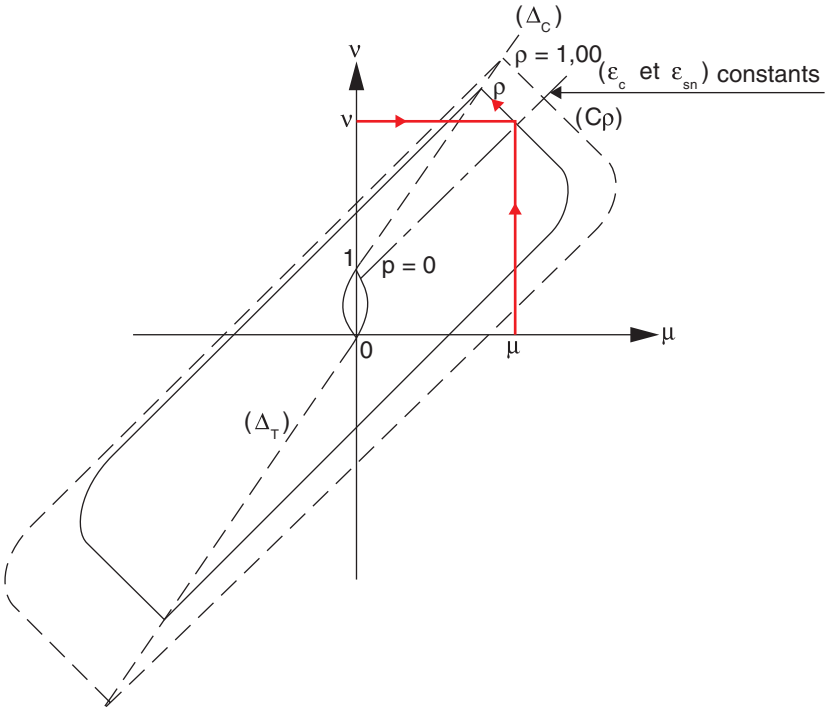


5.6.2 Mode opératoire

1/ Calculer les quantités réduites d'entrée dans les diagrammes :

$$\nu = \frac{N_{Ed}}{b_w.h.f_{cd}}$$

2/ Déterminer, sur le diagramme d'interaction, par interpolation suivant les droites « rayonnantes » correspondant à x = Cste, le pourcentage mécanique d'armatures ρ :



3/ Calculer les armatures :

$$\rho = \frac{\left(\sum A_s\right) f_{yd}}{b_w.h.f_{cd}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\sum A_s = \rho \frac{f_{cd}}{f_{yd}} b_w.h}$$

5.7 Application à la vérification des sections rectangulaires

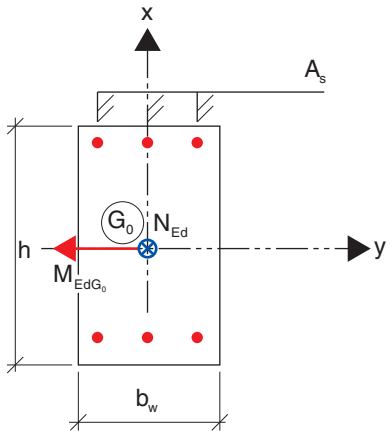
5.7.1 Données

$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$ et $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$,

N_{Ed} et M_{EdG_0} ($M_{EdG_0} = N_{Ed}\left(e_1 + e_i + \Delta e_0\right)$ si N_{Ed} est une compression).

b_w et h

$\sum A_s$



5.7.2 Mode opératoire

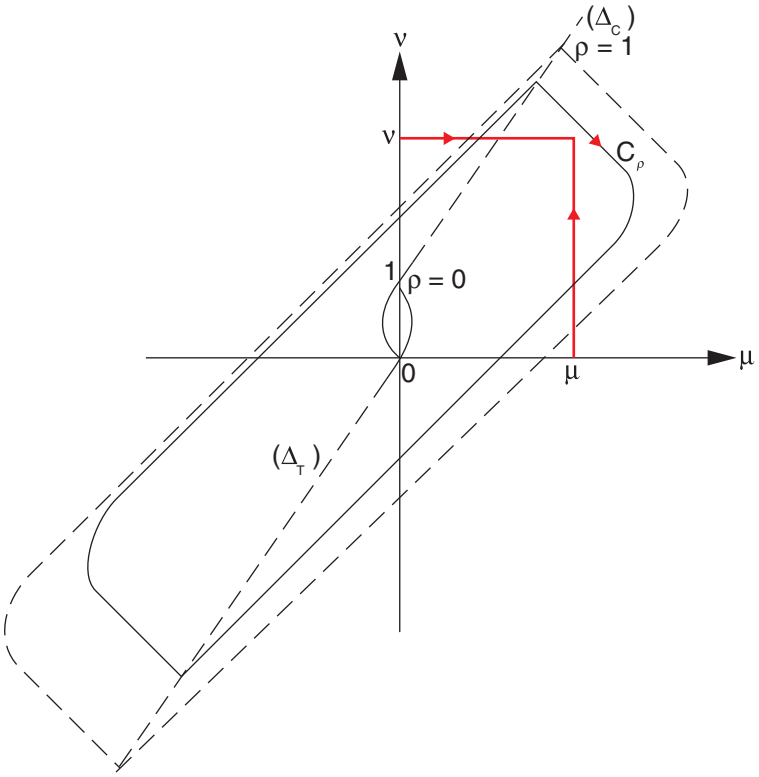
1/ Calculer les quantités réduites d'entrée dans les diagrammes :

$$\nu = \frac{N_{Ed}}{b_w.h.f_{cd}}$$

$$\mu = \frac{M_{EdG_0}}{b_w.h^2.f_{cd}}$$

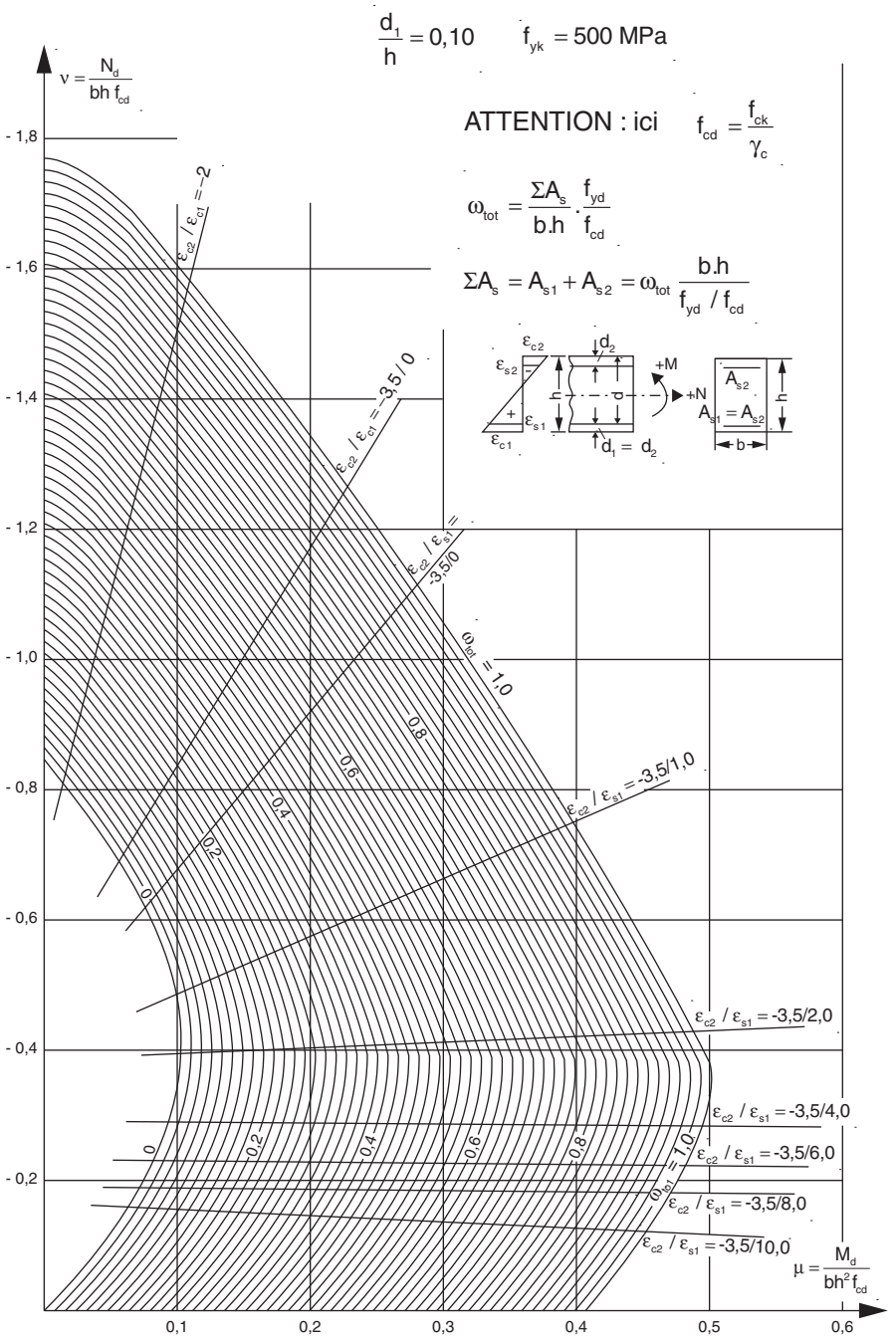
$$\rho = \frac{\left(\sum A_s\right) f_{yd}}{b_w.h.f_{cd}}$$

2/ Vérifier sur le diagramme d'interaction que le point de coordonnées (μ, ν) se trouve à l'intérieur ou sur la courbe (C_ρ) correspondant au pourcentage mécanique d'armatures ρ calculé :

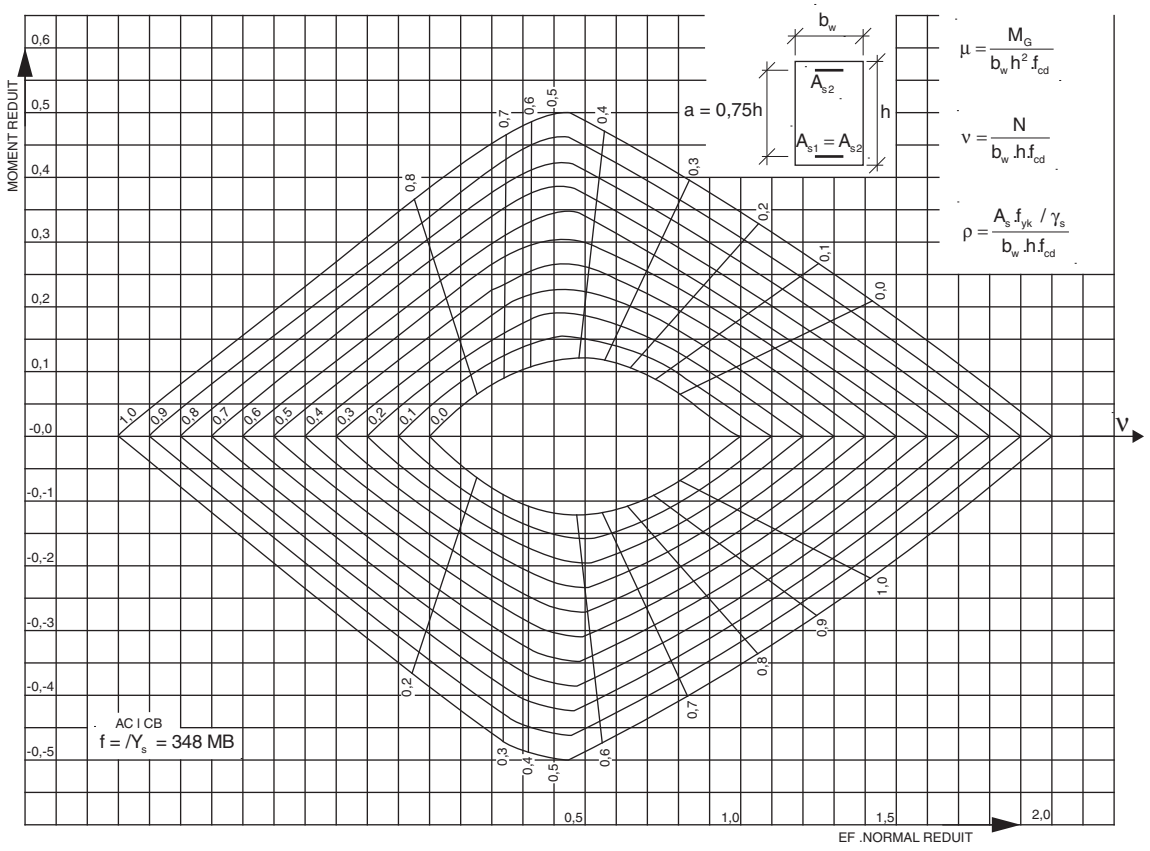


5.8 Exemples de diagrammes d'interaction

Section rectangulaire à armatures symétriques[1]:



Abaque d'interaction



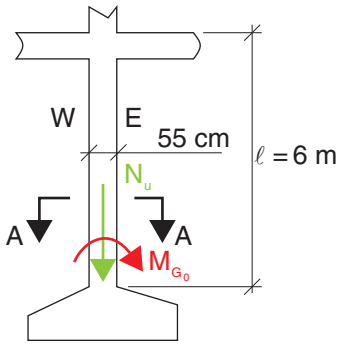
L'abaque est valable seulement pour :

- acier $f_{yk} / \gamma_s = 348$ MPa ;
- enrobage des aciers : a/ h = 0,75 ;
- sections d'armatures égales sur chaque face.

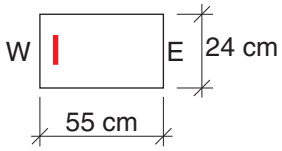
II. APPLICATIONS

Application n° 1 : flexion-compression – Section partiellement tendue

–Énoncé–



COUPE AA



- Sollicitations ramenées au centre de gravité du béton seul :
  - permanentes :
    $N_g = 85$ kN,
    $M_g = 90$ mkN,
  - variables :
    $N_q = 75$ kN,
    $M_q = 80$ mkN.
  - rapport des moments en pied de poteau :
    $$\frac{|M_{01}|}{|M_{02}|} = \frac{1}{3}$$
- Élément d'une structure contreventée.
- Classe d'exposition XD2.

- Matériaux :
  - béton : $f_{ck} = 25$ MPa ;
  - aciers : S 500 à palier horizontal.

On se propose :

1/ de calculer les armatures en pied de poteau ;

2/ de vérifier les contraintes à l'ELS pour $\alpha_e = \dfrac{E_s}{E_{c,\,eff}} = 15$.

–Corrigé–

1. Caractéristiques des matériaux

1.1 Béton

1.1.1 Résistance de calcul

$f_{ck} >< 50\ MPa \Rightarrow \begin{cases} \lambda, \\ \eta \end{cases}$ $\qquad$ $f_{ck} = 25\ MPa < 50\ MPa \Rightarrow \begin{cases} \lambda = 0,8 \\ \eta = 1 \end{cases}$

$f_{cd} = \alpha_{cc} \dfrac{f_{ck}}{\gamma_c}$ $\qquad$ $f_{cd} = 1\dfrac{25}{1,5} = 16,7\ MPa$

$f_{cu} = \eta \dfrac{f_{ck}}{\gamma_c}$ $\qquad$ $f_{cu} = 1\dfrac{25}{1,5} = 16,7\ MPa$

1.1.2 Résistance à la traction

$f_{ck} \leq 50\ MPa \Rightarrow f_{ctm} = 0,3\left[f_{ck}\right]^{2/3}$ $\qquad$ $f_{ctm} = 0,3\left[25\right]^{2/3} = 2,56\ MPa$

1.1.3 Contrainte limite à l'ELS

$\overline{\sigma_c} = k_1.f_{ck}$ $\qquad$ $\overline{\sigma_c} = 0,6.25 = 15\ MPa$

1.2 Aciers

1.2.1 Résistance de calcul

$f_{yd} = \dfrac{f_{yk}}{\gamma_s}$ $\qquad$ $f_{yd} = \dfrac{500}{1,15} = 435\ MPa$

1.2.2 Contrainte limite à l'ELS

$\overline{\sigma_s} = k_3.f_{yk}$ $\qquad$ $\overline{\sigma_s} = 0,8.500 = 400\ MPa$

2. Sollicitations en pied de poteau

2.1 État limite ultime

2.1.1 Sollicitations de calcul

$\sum \gamma_j.M_{jG_0} = 1,35.M_g + 1,5.M_q$

$\sum \gamma_j.M_{jG_0} = 1,35.90 + 1,5.80 = 241,5\ mkN$

$\sum \gamma_i.N_i = 1,35.N_g + 1,5.N_q$ $\sum \gamma_i.N_i = 1,35.85 + 1,5.75 = 227,25$ kN

$e_1 = \dfrac{\sum \gamma_j.M_{jG_0}}{\sum \gamma_i.N_i}$ $e_1 = \dfrac{241,50}{227,25} = 1,063$ m

2.1.2 Sollicitations ultimes corrigées

- Puisque $N_{Ed} > 0$ est une compression.
- Élancement géométrique :

poteau articulé dans un massif de fondation et encastré dans une poutre :

$l_0 = l\dfrac{\sqrt{2}}{2}$ $l_0 = 6,00\dfrac{\sqrt{2}}{2} = 4,24$ m

- Type de calcul :

$A = \dfrac{1}{1 + 0,2.\varphi_{ef}} = 0,7$ si φ_{ef} est inconnu : $A = 0,7$

$B = \sqrt{1 + 2.\omega} = 1,1$ si ω est inconnu : $B = 1,1$

$C = 1,7 - r_m = 0,7$ si r_m est inconnu : $r_m = \dfrac{M_{01}}{M_{02}} = \dfrac{1}{3} \Rightarrow C = 1,7 - \dfrac{1}{3} = 1,37$

$n = \dfrac{N_{Ed}}{A_c.f_{cd}}$ = effort normal réduit : $N_{Ed} = 1,35.85 + 1,5.75 = 227,25$ kN

$\Rightarrow n = \dfrac{227,25.10^{-3}}{0,24.0,55.16,7} = 0,103$

Dans le plan parallèle au côté h = 55 cm (plan de flambement du fait du moment fléchissant) :

$i_{min} = \dfrac{h}{\sqrt{12}}$ $i_{min} = \dfrac{0,55}{\sqrt{12}} = 0,151$ m

$\lambda = \dfrac{l_0}{i} >< \lambda_{lim} = \dfrac{20.A.B.C}{\sqrt{n}}$

$\lambda = \dfrac{4,24}{0,151} = 28,08 < 65,74 = \lambda_{lim} = \dfrac{20.0,7.1,1.1,37}{\sqrt{0,103}}$

$\Rightarrow$ Calcul en flexion composée.

Dans le plan parallèle au côté b = 24 cm :

$i_{min} = \dfrac{b}{\sqrt{12}}$ $i_{min} = \dfrac{0,24}{\sqrt{12}} = 0,07$ m

$$\lambda = \frac{l_0}{i} >< \lambda_{lim} = \frac{20.A.B.C}{\sqrt{n}}$$

$$\lambda = \frac{4,24}{0,07} = 60,57 < 65,74 = \lambda_{lim} = \frac{20.0,7.1,1.1,37}{\sqrt{0,103}}$$

et le poteau est à calculer en compression simple dans cette direction.

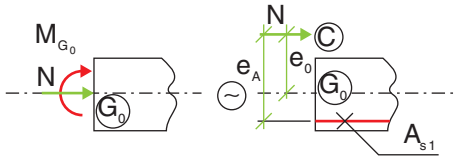
- Sollicitations corrigées pour le calcul en flexion composée :
  - poteau isolé d'une structure contreventée :

$$\Rightarrow \quad e_i = \frac{l_0}{400} \qquad \Rightarrow \quad e_i = \frac{4,24}{400} = 0,0106 \text{ m}$$

  - section droite avec ferraillage non symétrique : $\Rightarrow \quad \Delta e_0 = 0,0$ m
  - sollicitations au centre de gravité de la section de béton seul :

$$\begin{cases} N_{Ed} = \sum \gamma_i . N_i \\ M_{EdG_0} = N_{Ed}\left(e_1 + e_i\right) \\ e_0 = e_1 + e_i + \Delta e_0 \end{cases} \qquad \begin{cases} N_{Ed} = 227,25 \text{ kN} \\ M_{EdG_0} = 227,25\left(1,063 + 0,0106\right) = 243,98 \text{ mkN} \\ e_0 = 1,063 + 0,0106 + 0,00 = 1,074 \text{ m} \end{cases}$$

- Sollicitations ramenées au centre de gravité des aciers tendus :



$$\begin{cases} e_A = e_0 + \left(d - \frac{h}{2}\right) \\ M_{EdA} = N_{Ed} . e_A \end{cases} \qquad \begin{cases} e_A = 1,074 + 0,50 - \frac{0,55}{2} = 1,299 \text{ m} \\ M_{EdA} = 227,25.1,299 = 295,20 \text{ mkN} \end{cases}$$

2.2 État limite de service

$$\begin{cases} N_{ser} = N_g + N_q \\ M_{serG_0} = M_g + M_q \\ e_{0ser} = \frac{M_{serG_0}}{N_{ser}} \end{cases} \qquad \begin{cases} N_{ser} = 85 + 75 = 160 \text{ kN} \\ M_{serG_0} = 90 + 80 = 170 \text{ mkN} \\ e_{0ser} = \frac{170}{160} = 1,063 \text{ m} \end{cases}$$

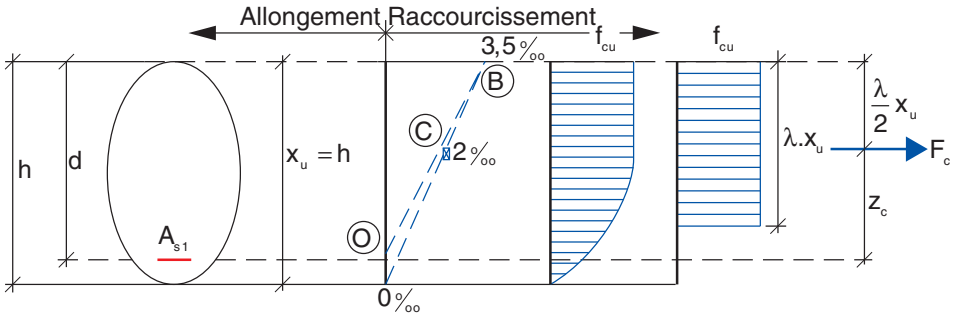
- On remarque que e_0 à l'ELU est différent de e_{0ser} à l'ELS.
- Sollicitations ramenées au centre de gravité des aciers tendus :

$$\begin{cases} e_A = e_{0ser} + \left(d - \dfrac{h}{2}\right) \\ M_{serA} = N_{ser}.e_A \end{cases} \qquad \begin{cases} e_A = 1,063 + 0,50 - \dfrac{0,55}{2} = 1,288 \text{ m} \\ M_{serA} = 160.1,288 = 206,08 \text{ mkN} \end{cases}$$

3. Armatures

3.1 Introduction

Moment réduit de référence à l'ELU :



$$\mu_{BC} = \lambda \frac{h}{d}\left(1 - \frac{\lambda}{2}.\frac{h}{d}\right) \qquad \mu_{BC} = 0,8\frac{55}{50}\left(1 - 0,4\frac{55}{50}\right) = 0,4928$$

Moment réduit agissant :

$$\mu_{cu} = \frac{M_{EdA}}{b_w.d^2.f_{cu}} \qquad \mu_{cu} = \frac{295,20.10^{-3}}{0,24.0,50^2.16,7} = 0,295$$

Conclusion :

$\mu_{cu} >< \mu_{BC}$ $\qquad$ $\mu_{cu} = 0,295 < 0,4928 = \mu_{BC}$

$\Rightarrow$ Section partiellement tendue.

3.2 Calcul des aciers en flexion simple

3.2.1 Nécessité d'aciers comprimés

Moment réduit limite (classe d'exposition XD2 $\Rightarrow$ σ_c limitée) :

$$\gamma_M = \frac{M_{EdA}}{M_{serA}} \qquad \gamma_M = \frac{295,20}{206,08} = 1,432$$

$$\gamma_N = \frac{N_{Ed}}{N_{ser}} \qquad \gamma_N = \frac{227,25}{160} = 1,42$$

$$\nu_u = \frac{N_{Ed}}{b_w.d.f_{cu}} \qquad \nu_u = \frac{227,25.10^{-3}}{0,24.0,50.16,7} = 0,113$$

Les tableaux de l'annexe A3 donnent les valeurs de $10^4 \mu_{lu}$, pour S 500, $\alpha_e = 15$ et $f_{ck} \leq 35$ MPa :

$\nu_u = 0{,}10$	$\gamma_m = 1{,}40$	1,45	1,43
$\gamma_N = 1{,}40$	2 234	2 390	
1,45	2 211	2 369	
1,42	2 225	2 382	2 319

$\nu_u = 0{,}15$	$\gamma_m = 1{,}40$	1,45	1,43
$\gamma_N = 1{,}40$	2 195	2 387	
1,45	2 139	2 341	
1,42	2 173	2 369	2 291

$$\nu_u = 0{,}13 \Rightarrow 10^4 \mu_{lu} = 2319 + (2291 - 2319)\frac{0{,}013}{0{,}05} = 2312$$

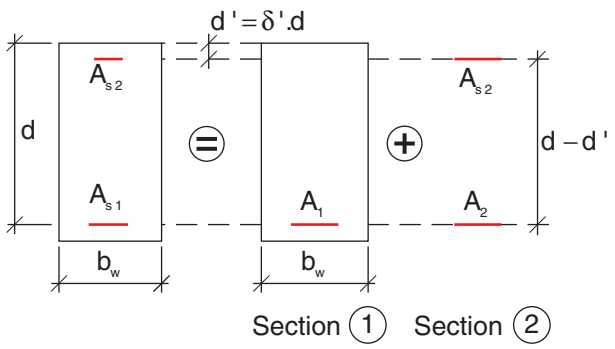
soit : $\mu_{lu} = 0{,}231$ (à comparer à $\mu_{lu} = 0{,}234$ considéré si on négligeait l'effet de l'effort normal).

Nécessité d'aciers comprimés A_{s2} :

$\mu_{cu} >< \mu_{lu}$ $\qquad$ $\mu_{cu} = 0{,}295 > 0{,}231 = \mu_{lu}$

$\Rightarrow A_{s2}$ nécessaires.

3.2.2 Section A_{s2} d'aciers comprimés



d = 50 cm

d' = 5 cm

b_w = 24 cm

Contrainte $\sigma_{s2,\,e}$ des aciers comprimés :

S 500 PH : $\underbrace{\sigma_{s2,\,e}}_{(MPa)} = 0{,}6.\alpha_e.\gamma.\underbrace{f_{ck}}_{(MPa)} - \delta'(A.\underbrace{f_{ck}}_{(MPa)} + B)$

où $\gamma = \gamma_M$

avec : $\begin{cases} A = \dfrac{0,5}{\alpha_e} + 13 \\ B = \dfrac{6\,517}{\alpha_e} + 1 \end{cases}$ $\begin{cases} A = \dfrac{0,5}{15} + 13 = 13,03 \\ B = \dfrac{6\,517}{15} + 1 = 435,47 \end{cases}$

$$\sigma_{s2,\,e} = 0,6.15.1,432.25 - \frac{5}{50}(13,03.25 + 435,47)$$

$$\sigma_{s2,\,e} = 246,08 \approx 246 \text{ MPa}$$

Aciers comprimés :

$M_{lu} = \mu_{lu}.b_w.d^2.f_{cu}$ $\quad M_{lu} = 0,231.0,24.0,50^2.16,7 = 0,2315 \text{ mMN}$

$A_{s2} = \mathcal{A}_{s2}\dfrac{M_{EdA} - M_{lu}}{(d - d').\sigma_{s2,\,e}}$ $\quad A_{s2} = \mathcal{A}_{s2}\dfrac{0,2952 - 0,2315}{(0,50 - 0,05).246}10^4 = 5,75 \text{ cm}^2$

3.2.3 Section A_{s1} d'aciers tendus

Dans la section fictive ① sans aciers comprimés :

$\mu_{cu} = \mu_{lu} >< 0,225 \Rightarrow$ Méthode $\quad \mu_{cu} = 0,231 > 0,225 \Rightarrow$ Formules exactes

$\Rightarrow \quad \alpha_u = \dfrac{1}{\lambda}\left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{cu}}\right]$ $\quad \alpha_u = \dfrac{1}{0,8}\left[1 - \sqrt{1 - 2.0,231}\right] = 0,333$

$\Rightarrow \quad z_c = d\left[1 - \dfrac{\lambda}{2}\alpha_u\right]$ $\quad z_c = 0,50\left[1 - \dfrac{0,8}{2}0,333\right] = 0,433 \text{ m}$

$$\underset{(MPa)}{\sigma_{s1,\,e}} = \left(\underset{(MPa)}{A.\,f_{ck}} + B\right) - 0,6.\alpha_e.\gamma.\underset{(MPa)}{f_{ck}} \le 435 \text{ MPa} \text{ où } \gamma = \gamma_M$$

avec : $\begin{cases} A = \dfrac{0,5}{\alpha_e} + 13 \\ B = \dfrac{6\,517}{\alpha_e} + 1 \end{cases}$ $\begin{cases} A = \dfrac{0,5}{15} + 13 = 13,03 \\ B = \dfrac{6\,517}{15} + 1 = 435,47 \end{cases}$

$$\sigma_{s1,\,e} = (13,03.25 + 435,47) - 0,6.15.1,432.25$$

$$\sigma_{s1,\,e} = 439,02 \approx 439 \text{ MPa} > 435 \text{ MPa}$$

$$\Rightarrow \quad \sigma_{s1,\,e} = 435 \text{ MPa}$$

$\Rightarrow \quad \mathcal{A}_{s1} = \dfrac{M_{lu}}{z_c.f_{yd}} + \mathcal{A}_{s2}\dfrac{\sigma_{s2,\,e}}{\sigma_{s1,\,e}}$ $\quad \mathcal{A}_{s1} = \dfrac{0,2315}{0,433.435}10^4 + 5,75\,\dfrac{246}{435} = 15,54 \text{ cm}^2$

3.3 Armatures en flexion composée

$$A_{s1} = \mathcal{A}_{s1} - \frac{N_{Ed}}{\sigma_{s1,e}} \qquad A_{s1} = 15,54 - \frac{0,227}{435}10^4 = 10,32 \text{ cm}^2$$

• En prenant 3 files verticales :

⇒ Aciers comprimés :

$3\ \phi\ 16$ HA : $A_{s2} = 3.2,01 = 6,03 \text{ cm}^2$

⇒ Aciers tendus :

lit 1 : $3\ \phi\ 16$ HA : $3.2,01 = 6,03 \text{ cm}^2$

lit 2 : $3\ \phi\ 16$ HA : $3.2,01 = 6,03 \text{ cm}^2$

$\overline{A_{s1} = 12,06 \text{ cm}^2}$

• Maîtrise de la fissuration non requise – Section minimale :

Maîtrise de la fissuration non requise ⇒ $f_{ct,\,eff} = f_{ctm,\,fl} = \text{Max}\left\{\left(1,6 - \frac{h}{1\,000}\right) f_{ctm} \;;\; f_{ctm}\right.$

$$f_{ct,\,eff} = 2,69 \text{ MPa} = \text{Max}\left\{\left(1,6 - \frac{550}{1\,000}\right) 2,56 = 2,69 \text{ MPa} \;;\; f_{ctm} = 2,56 \text{ MPa}\right.$$

$$A_{s1} >< A_{s,\,min} = \text{Max}\left\{0,26\frac{f_{ct,\,eff}}{f_{yk}} b_t.d \;;\; 0,0013.b_t.d\right.$$

$$A_{s1} = 10,32 \text{ cm}^2 > 1,68 \text{ cm}^2 = \text{Max}\left\{0,26\frac{2,69}{500}24.50 = 1,68 \;;\; 0,0013.24.50 = 1,56\right. \text{ O.K.}$$

• Maîtrise de la fissuration requise – Section minimale :

$v' = \frac{h}{2}$ (section rectangulaire) $\qquad v' = \frac{0,55}{2} = 0,275 \text{ m}$

$\rho = \frac{I}{A_c.v.v'} = \frac{1}{3}$ (section rectangulaire) $\quad \rho = \frac{1}{3}$

$e_0 >< \rho.v' \qquad e_0 = e_{0ser} = 1,063 \text{ m} > 0,092 \text{ m} = \frac{1}{3}0,275$

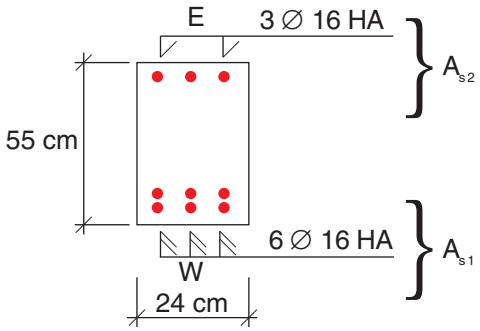
⇒ Section partiellement tendue.

$$A_{s,\ min} = 0,23\frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_w.d\frac{e_0 - 0,45.d}{e_0 - 0,185.d}$$

$$A_{s,\ min} = 0,23\frac{2,56}{500} 24.50\frac{1,063 - 0,45.0,50}{1,063 - 0,185.0,50} = 1,22\ cm^2$$

$A_{s1} >< A_{s,\ min}$ $\qquad A_{s1} = 10,32\ cm^2 > 1,22\ cm^2 = A_{s,\ min}$ O.K.

3.4 Schéma de ferraillage



4. Vérification des contraintes à l'ELS

4.1 Contraintes dans la section non fissurée

$$A_{ch} = b_w.h + \alpha_e\left(A_{s1} + A_{s2}\right)$$

$$A_{ch} = 0,24.0,55 + 15(12,06 + 6,03)10^4 = 0,1591\ m^2$$

$$v' = \frac{\frac{b_w.h^2}{2} + \alpha_e\left(A_{s1}.d + A_{s2}.d'\right)}{A_{ch}}$$

$$v' = \frac{\frac{0,24.0,55^2}{2} + 15(12,06.0,50 + 6,03.0,05)10^{-4}}{0,1591} = 0,2879\ m$$

$v = h - v'$ $\qquad v = 0,55 - 0,2879 = 0,262\ m$

$$I_{ch} = \frac{b_w.h^3}{3} + \alpha_e\left(A_{s1}.d^2 + A_{s2}.d'^2\right) - A_{ch}.v'^2$$

$$I_{ch} = \frac{0,24.0,55^3}{3} + 15\left(12,06.0,50^2 + 6,03.0,05^2\right)10^{-4} - 0,1591.0,2879^2 = 4,659.10^{-3}\ m^4$$

$$v'_c = \frac{b_w.h^2}{2.b_w.h} = \frac{h}{2} \qquad v'_c = \frac{0,55}{2} = 0,275 \text{ m}$$

$$M_{ser/AN} = N_{ser}.e_{AN} = N_{ser}\left(e_{0ser} - v'_c + v'\right)$$

$$M_{ser/AN} = 160.10^{-3}\left(1,063 - 0,275 + 0,288\right) = 0,172 \text{ mMN}$$

$$\sigma_{ct} = \frac{N_{ser}}{A_{ch}} - \frac{M_{ser/AN}.v}{I_{ch}} \qquad \sigma_{ct} = \frac{160.10^{-3}}{0,1591} - \frac{0,172.0,262}{4,659.10^{-3}} = -8,7 \text{ MPa}$$

- Cas où la maîtrise de la fissuration n'est pas requise :

  $\sigma_{ct} >< f_{ct,\ eff}$ $\qquad \sigma_{ct} = 8,7 \text{ MPa} > 2,69 \text{ MPa} = f_{ct,\ eff}$

- Cas où la maîtrise de la fissuration est requise :

  $\sigma_{ct} >< f_{ctm}$ $\qquad \sigma_{ct} = 8,7 \text{ MPa} > 2,56 \text{ MPa} = f_{ctm}$

Conclusion :

$\Rightarrow$ Considérer la section fissurée.

4.2 Contraintes dans la section fissurée

$c = d - e_A$ (à l'ELS) $\qquad c = 0,50 - 1,288 = -0,788$ m (voir § 2.2 pour e_A avec $N_{ser} > 0 \Rightarrow e_A > 0$)

$$x_c^3 + p.x_c + q = 0$$

$$p = -3.c^2 + \frac{6.\alpha_e.A_{s2}}{b_w}(d' - c) + \frac{6.\alpha_e.A_{s1}}{b_w}(d - c)$$

$$p = -3.0,788^2 + \frac{6.15.6,03.10^{-4}}{0,24}(0,05 + 0,788) + \frac{6.15.12,06.10^{-4}}{0,24}(0,50 + 0,788)$$

$$p = -1,0908$$

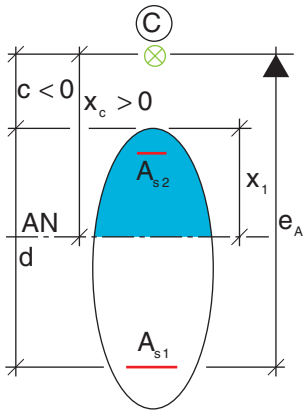
$$q = -2.c^3 - \frac{6.\alpha_e.A_{s2}}{b_w}(d' - c)^2 - \frac{6.\alpha_e.A_{s1}}{b_w}(d - c)^2$$

$$q = 2.0,788^3 - \frac{6.15.6,03.10^{-4}}{0,24}(0,05 + 0,788)^2 - \frac{6.15.12,06.10^{-4}}{0,24}(0,50 + 0,788)^2$$

$$q = 0,0696$$

$$x_c^3 - 1,0908.x_c + 0,0696 = 0$$

soit par approximations successives ($-c < x_c < d - c$) la section étant partiellement tendue avec $N_{ser} > 0$:



x_c (m)	$f(x_c) = x_c^3 - 1{,}0908.x_c + 0{,}0696$	$f(x_c) \gtrless 0$
$-c \approx 0{,}8$	$-0{,}291$	< 0
$d - c \approx 1{,}30$	$0{,}8486$	> 0
$1{,}05$	$0{,}0819$	> 0
$0{,}925$	$-0{,}1479$	< 0
$0{,}988$	$-0{,}0446$	< 0
$1{,}019$	$0{,}0161$	> 0
$1{,}004$	$-0{,}0145$	< 0
$1{,}012$	$0{,}0012$	> 0
$1{,}008$	$-0{,}0057$	< 0
$1{,}010$	$-0{,}0018$	< 0
$1{,}011$	$0{,}0002$	> 0

$$\Rightarrow \quad x_c = 1{,}011 \text{ m}$$

$x_1 = x_c + c$ $\qquad x_1 = 1{,}011 - 0{,}788 = 0{,}223$ m

$x_1 \gtrless d$ $\qquad x_1 = 0{,}223 \text{ m} < 0{,}50 \text{ m} = d$

$\Rightarrow$ Une nappe d'aciers tendus.

$$I_{cf} = \frac{b_w . x_1^3}{3} + \alpha_e . A_{s2} \left(x_1 - d'\right)^2 + \alpha_e . A_{s1} \left(d - x_1\right)^2$$

$$I_{cf} = \frac{0{,}24.0{,}223^3}{3} + 15.6{,}03.10^{-4} \left(0{,}223 - 0{,}05\right)^2 + 15.12{,}06.10^{-4} \left(0{,}50 - 0{,}223\right)^2$$

$$I_{cf} = 2{,}5459.10^{-3} \text{ m}^4$$

$$K = \frac{N_{ser}.x_c}{I_{cf}} \qquad K = \frac{160.10^{-3}.1,011}{2,5459.10^{-3}} = 63,54 \text{ MN/m}^3$$

$\sigma_c = K.x_1 >< \overline{\sigma_c}$ pour les classes d'exposition XD, XF et XS

classe d'exposition XD2

$$\Rightarrow \boxed{\sigma_c = 63,54.0,223 = 14,16 \text{ MPa} < 15 \text{ MPa} = \overline{\sigma_c} \quad \text{O.K.}}$$

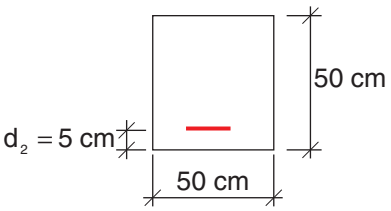
$\sigma_{s1} = \alpha_e.K(d - x_1) >< \overline{\sigma_s}$

$$\boxed{\sigma_{s1} = 15.63,54(0,50 - 0,223) = 264 \text{ MPa} < 400 \text{ MPa} = \overline{\sigma_s} \text{ O.K.}}$$

$$\frac{\sigma_{s1}}{f_{yk}} = \frac{264}{500} = 0,52$$

Application n° 2 : flexion-traction – Section partiellement tendue

–Énoncé–



- Sollicitations ramenées au centre de gravité du béton seul :
  - permanentes :
    $N_g = -200$ kN, $M_g = 80$ mkN ;
  - variables :
    $N_q = -160$ kN, $M_q = 60$ mkN.
- Maîtrise de la fissuration non requise.
- Matériaux :
  - béton : $f_{ck} = 25$ MPa ;
  - aciers : S 500 à palier horizontal.
- Classe d'exposition XD2.

On se propose :
1/ de calculer les armatures ;

2/ de vérifier les contraintes à l'ELS pour $\alpha_e = \frac{E_s}{E_{c,\,eff}} = 15$.

–Corrigé–

1. Caractéristiques des matériaux

1.1 Béton

1.1.1 Résistance de calcul

$f_{ck} >< 50$ MPa $\Rightarrow \begin{cases} \lambda, \\ \eta \end{cases}$ $\quad f_{ck} = 25 \text{ MPa} < 50 \text{ MPa} \Rightarrow \begin{cases} \lambda = 0,8 \\ \eta = 1 \end{cases}$

$f_{cu} = \eta \dfrac{f_{ck}}{\gamma_c}$ $\quad f_{cu} = 1 \dfrac{25}{1,5} = 16,7 \text{ MPa}$

1.1.2 Résistance à la traction

$f_{ck} \leq 50$ MPa $\Rightarrow$ $f_{ctm} = 0,3\left[f_{ck}\right]^{2/3}$ $\quad f_{ctm} = 0,3\left[25\right]^{2/3} = 2,56$ MPa

1.1.3 Contrainte limite à l'ELS

$\overline{\sigma_c} = k_1.f_{ck}$ $\quad \overline{\sigma_c} = 0,6.25 = 15$ MPa

1.2 Aciers

1.2.1 Résistance de calcul

$f_{yd} = \dfrac{f_{yk}}{\gamma_s}$ $\quad f_{yd} = \dfrac{500}{1,15} = 435$ MPa

1.2.2 Contrainte limite à l'ELS

$\overline{\sigma_s} = k_3.f_{yk}$ $\quad \overline{\sigma_s} = 0,8.500 = 400$ MPa

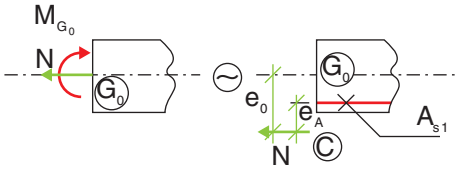
2. Sollicitations

2.1 État limite ultime

Au centre de gravité du béton seul :

$\begin{cases} M_{EdG_0} = 1,35.M_g + 1,5.M_q \\ N_{Ed} = 1,35.N_g + 1,5.N_q \\ e_0 = \dfrac{M_{EdG_0}}{N_{Ed}} \end{cases}$ $\quad \begin{cases} M_{EdG_0} = 1,35.80 + 1,5.60 = 198 \text{ mkN} \\ N_{Ed} = -1,35.200 - 1,5.160 = -510 \text{ kN} \\ e_0 = \dfrac{198}{-510} = -0,388 \text{ m} \end{cases}$

• Sollicitations ramenées au centre de gravité des aciers tendus :



$$\begin{cases} e_A = |e_0| - \left(d - \dfrac{h}{2}\right) \\ M_{EdA} = N_{Ed}.e_A \end{cases} \qquad \begin{cases} e_A = 0,388 - 0,45 + \dfrac{0,50}{2} = 0,188 \text{ m} \\ M_{EdA} = 510.0,188 = 96 \text{ mkN} \end{cases}$$

2.2 État limite de service

Au centre de gravité du béton seul :

$$\begin{cases} M_{serG_0} = M_g + M_q \\ N_{ser} = N_g + N_q \\ e_{0ser} = \dfrac{M_{serG_0}}{N_{ser}} \end{cases} \qquad \begin{cases} M_{serG_0} = 80 + 60 = 140 \text{ mkN} \\ N_{ser} = -200 - 160 = -360 \text{ kN} \\ e_{0ser} = -\dfrac{140}{360} = -0,389 \text{ m} \end{cases}$$

Sollicitations ramenées au centre de gravité des aciers tendus :

$$\begin{cases} e_A = |e_{0ser}| - \left(d - \dfrac{h}{2}\right) \\ M_{serA} = N_{ser}.e_A \end{cases} \qquad \begin{cases} e_A = 0,389 - 0,45 + \dfrac{0,50}{2} = 0,189 \text{ m} \\ M_{serA} = 360.0,189 = 68 \text{ mkN} \end{cases}$$

3. Armatures

3.1 Introduction

À l'état limite ultime :

$N_{Ed} < 0$ (traction) $\qquad N_{Ed} = -510$ kN $\Rightarrow$ Traction

$|e_0| >< \dfrac{h}{2} - d_2 \qquad |e_0| = 0,388 \text{ m} > 0,20 \text{ m} = \dfrac{0,50}{2} - 0,05$

$\Rightarrow$ Le centre de pression est à l'extérieur des armatures.

$\Rightarrow$ Section partiellement tendue.

3.2 Calcul en flexion simple

3.2.1 Nécessité d'aciers comprimés

• Moment réduit limite (classe d'exposition XD2 $\Rightarrow$ σ_c limitée) :

$$\gamma_M = \frac{M_{EdA}}{M_{serA}} \qquad \gamma_M = \frac{96}{68} = 1,412$$

$$\gamma_N = \frac{N_{Ed}}{N_{ser}} \qquad \gamma_N = \frac{510}{360} = 1,42$$

$$\nu_u = \frac{N_{Ed}}{b_w.d.f_{cu}} \qquad \nu_u = \frac{0,510}{0,50.0,45.16,7} = 0,136 \approx 0,14$$

Les tableaux de l'annexe A3 donnent les valeurs de $10^4\,\mu_{pu}$, pour S 500, $\alpha_e = 15$ et $f_{ck} \leq 35$ MPa :

$\nu_u = 0,10$	$\gamma_M = 1,40$	1,45	1,41
$\gamma_N = 1,40$	2 258	2 413	
1,45	2 231	2 390	
1,42	2 247	2 484	2 294

$\nu_u = 0,15$	$\gamma_M = 1,40$	1,45	1,41
$\gamma_N = 1,40$	2 249	2 433	
1,45	2 195	2 387	
1,42	2 227	2 415	2 265

$$\nu_u = 0,14 \quad \Rightarrow \quad 10^4\mu_{lu} = 2294 + (2265 - 2294)\frac{4}{5} = 2270$$

soit : $\mu_{lu} = 0,227$

• Nécessité d'aciers comprimés A_{s2} :

$$\mu_{cu} = \frac{M_{EdA}}{b_w.d^2.f_{cu}} \qquad \mu_{cu} = \frac{0,096}{0,50.0,45^2.16,7} = 0,057$$

$\mu_{cu} >< \mu_{lu}$ $\qquad$ $\mu_{cu} = 0,057 < 0,227 = \mu_{lu}$

$\Rightarrow A_{s2}$ non nécessaires.

3.2.2 Section A_{s1} d'aciers tendus

$\mu_{cu} >< 0,225 \Rightarrow$ Méthode $\qquad$ $\mu_{cu} = 0,057 < 0,225 \Rightarrow$ Formules simplifiées

$\Rightarrow \quad z_c = d\left[1 - 0,6.\mu_{cu}\right]$ $\qquad$ $z_c = 0,45\left[1 - 0,6.0,057\right] = 0,435$ m

$$\Rightarrow \quad \mathcal{A}_{s1} = \frac{M_{EdA}}{z_c f_{yd}} \qquad \mathcal{A}_{s1} = \frac{0,096}{0,435.435}10^4 = 5,07\ \text{cm}^2$$

3.3 Armatures en flexion composée

$$A_{s1} = \mathcal{A}_{s1} - \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} \text{ (avec } N_{Ed} < 0) \qquad A_{s1} = 5,07 + \frac{0,510}{435} 10^4 = 16,79 \text{ cm}^2$$

- En prenant 4 files verticales :

$\Rightarrow$ Aciers tendus inférieurs :

lit 1 : 4 ϕ 20 HA : 4.3,14 = 12,56 cm²
lit 2 : 4 ϕ 12 HA : 4.1,13 = 4,52 cm²
$A_{s1} = 17,08 \text{ cm}^2$

- Section minimale :

Maîtrise de la fissuration non requise $\Rightarrow$

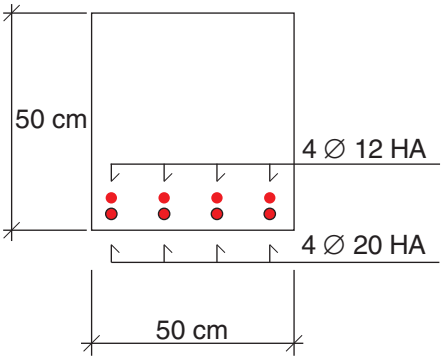
$$f_{ct,\,eff} = f_{ctm,\,fl} = \text{Max} \begin{cases} \left(1,6 - \frac{h}{1\,000}\right) f_{ctm} \\ f_{ctm} \end{cases}$$

$$f_{ct,\,eff} = 2,82 \text{ MPa} = \text{Max} \begin{cases} \left(1,6 - \frac{500}{1\,000}\right) 2,56 = 2,82 \text{ MPa} \\ f_{ctm} = 2,56 \text{ MPa} \end{cases}$$

$$A_{s1} >< A_{s,\,min} = \text{Max} \begin{cases} 0,26 \frac{f_{ct,\,eff}}{f_{yk}} b_t.d \\ 0,0013.b_t.d \end{cases}$$

$$A_{s1} = 17,08 \text{ cm}^2 > 3,30 \text{ cm}^2 = \text{Max} \begin{cases} 0,26 \frac{2,82}{500} 50.45 = 3,30 \\ 0,0013.50.45 = 2,93 \end{cases} \text{ O.K.}$$

3.4 Schéma du ferraillage



4. Vérification des contraintes à l'ELS

4.1 Contraintes dans la section non fissurée

$$A_{ch} = b_w.h + \alpha_e \left(A_{s1} + A_{s2}\right)$$

$$A_{ch} = 0,50.0,50 + 15.17,08.10^{4} = 0,2756 \text{ m}^2$$

$$v' = \frac{\frac{b_w.h^2}{2} + \alpha_e \left(A_{s1}.d + A_{s2}.d'\right)}{A_{ch}}$$

$$v' = \frac{\frac{0,50.0,50^2}{2} + 15.17,08.10^{-4}.0,45}{0,2756} = 0,269 \text{ m}$$

$$v = h - v' \qquad v = 0,50 - 0,269 = 0,231 \text{ m}$$

$$I_{ch} = \frac{b_w.h^3}{3} + \alpha_e \left(A_{s1}.d^2 + A_{s2}.d'^2\right) - A_{ch}.v'^2$$

$$I_{ch} = \frac{0,50.0,50^3}{3} + 15.17,08.10^{-4}.0,45^2 - 0,2756.0,269^2 = 6,079.10^{-3} \text{ m}^4$$

$$v'_c = \frac{b_w.h^2}{2.b_w.h} = \frac{h}{2} \qquad v'_c = \frac{0,50}{2} = 0,25 \text{ m}$$

$$M_{ser/AN} = N_{ser}.e_{AN} = N_{ser}\left(e_{0ser} - v'_c + v'\right)$$

$$M_{ser/AN} = 360.10^{-3}\left(0,389 - 0,250 + 0,269\right) = 0,147 \text{ mMN}$$

$$\sigma_{ct} = \frac{N_{ser}}{A_{ch}} - \frac{M_{ser/AN}.v}{I_{ch}} \qquad \sigma_{ct} = -\frac{360.10^{-3}}{0,2756} - \frac{0,147.0,231}{6,079.10^{-3}} = -6,9 \text{ MPa}$$

Maîtrise de la fissuration non requise (pour la même contrainte de traction du béton que celle utilisée pour la section minimale d'armatures) :

$\sigma_{ct} >< f_{ct,\ eff}$ $\qquad$ $\sigma_{ct} = 6,9 \text{ MPa} > 2,82 \text{ MPa} = f_{ct,\ eff}$

$\Rightarrow$ Considérer la section fissurée.

4.2 Contraintes dans la section fissurée

$c = d - e_A$ (à l'ELS) $\qquad$ $c = 0,45 + 0,189 = 0,639$ m (voir § 2.2 pour e_A avec $N_{ser} < 0 \Rightarrow e_A < 0$)

$$x_c^3 + p.x_c + q = 0$$

$$p = -3.c^2 + \frac{6.\alpha_e.A_{s2}}{b_w}(d' - c) + \frac{6.\alpha_e.A_{s1}}{b_w}(d - c)$$

$$p = -3.0,639^2 + \frac{6.15.17,08.10^{-4}}{0,50}(0,45 - 0,639)$$

$$p = -1,2831$$

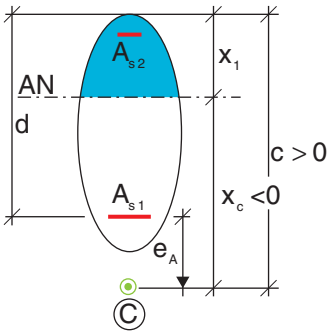
$$q = -2.c^3 - \frac{6.\alpha_e.A_{s2}}{b_w}(d' - c)^2 - \frac{6.\alpha_e.A_{s1}}{b_w}(d - c)^2$$

$$q = -2.0,639^3 - \frac{6.15.17,08.10^{-4}}{0,50}(0,45 - 0,639)^2$$

$$q = -0,5328$$

$$x_c^3 - 1,2831.x_c - 0,5328 = 0$$

soit par approximations successives ($-c < x_c < d - c$) la section étant partiellement tendue avec $N_{ser} < 0$:



x_c (m)	$f(x_c) = x_c^3 - 1,2831.x_c - 0,5328$	$f(x_c) \gtrless 0$
$-c \approx 0,64$	0,026	> 0
$d - c \approx 0,185$	– 0,764	< 0
– 0,276	– 0,253	< 0
– 0,458	– 0,041	< 0
– 0,549	0,0062	> 0
– 0504	– 0,014	< 0
– 0,527	– 0,0032	< 0
– 0,538	0,0018	> 0
– 0,533	– 0,0005	< 0
– 0,536	0,0007	> 0
– 0,535	0,0003	> 0

$$\Rightarrow \quad x_c = -0,535 \text{ m}$$

$x_1 = x_c + c$ $\qquad$ $x_1 = -0,535 + 0,639 = 0,104$ m

$x_1 \gtrless d$ $\qquad$ $x_1 = 0,104 \text{ m} < 0,45 \text{ m} = d$

$\Rightarrow$ Une nappe d'aciers tendus.

$$I_{cf} = \frac{b_w.x_1^3}{3} + \alpha_e.A_{s2}(x_1 - d')^2 + \alpha_e.A_{s1}(d - x_1)^2$$

$$I_{cf} = \frac{0,50.0,104^3}{3} + 15.17,08.10^{-4}(0,45 - 0,104)^2$$

$$I_{cf} = 3,2546.10^{-3} \text{ m}^4$$

$$K = \frac{N_{ser}.x_c}{I_{cf}} \qquad K = \frac{360.10^{-3}.0,535}{3,2546.10^{-3}} = 59,18 \text{ MN/m}^3$$

$\sigma_c = K.x_1 >< \overline{\sigma_c}$ pour les classes d'exposition XD, XF et XS

classe d'exposition XD2

$$\Rightarrow \boxed{\sigma_c = 59,18.0,104 = 6,15 \text{ MPa} < 15 \text{ MPa} = \overline{\sigma_c} \quad \text{O.K.}}$$

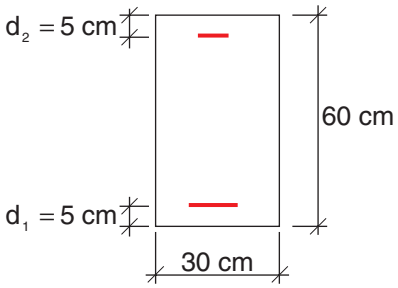
$\sigma_{s1} = \alpha_e.K\left(d - x_1\right) >< \overline{\sigma_s}$

$$\boxed{\sigma_{s1} = 15.59,18\left(0,45 - 0,104\right) = 307 \text{ MPa} < 400 \text{ MPa} = \overline{\sigma_s} \text{ O.K.}}$$

$$\frac{\sigma_{s1}}{f_{yk}} = \frac{307}{500} = 0,61$$

Application n° 3 : flexion-traction – Section entièrement tendue

–Énoncé–



- Sollicitations ramenées au centre de gravité du béton seul :
  - permanentes :
    $N_g = -200$ kN, $M_g = 20$ mkN,
  - variables :
    $N_q = -200$ kN, $M_q = 20$ mkN.
- Maîtrise de la fissuration non requise.
- Matériaux :
  - béton : $f_{ck} = 25$ MPa ;
  - aciers : S 500 à palier horizontal.

On se propose :
1/ de calculer les armatures à l'ELU ;
2/ de vérifier les contraintes à l'ELS.

–Corrigé–

1. Caractéristiques des matériaux

1.1 Béton

1.1.1 Résistance de calcul

$f_{ck} >< 50$ MPa $\Rightarrow \begin{cases} \lambda, \\ \eta \end{cases}$ $\qquad$ $f_{ck} = 25 \text{ MPa} < 50 \text{ MPa} \Rightarrow \begin{cases} \lambda = 0,8 \\ \eta = 1 \end{cases}$

$f_{cu} = \eta \dfrac{f_{ck}}{\gamma_c}$ $\qquad$ $f_{cu} = 1\dfrac{25}{1,5} = 16,7 \text{ MPa}$

1.1.2 Résistance à la traction

$f_{ck} \leq 50$ MPa $\Rightarrow$ $f_{ctm} = 0,3\left[f_{ck}\right]^{2/3}$ $f_{ctm} = 0,3\left[25\right]^{2/3} = 2,56$ MPa

1.2 Aciers

1.2.1 Résistance de calcul

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \qquad f_{yd} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ MPa}$$

1.2.2 Contrainte limite à l'ELS

$$\overline{\sigma_s} = k_3.f_{yk} \qquad \overline{\sigma_s} = 0,8.500 = 400 \text{ MPa}$$

2. Sollicitations ultimes

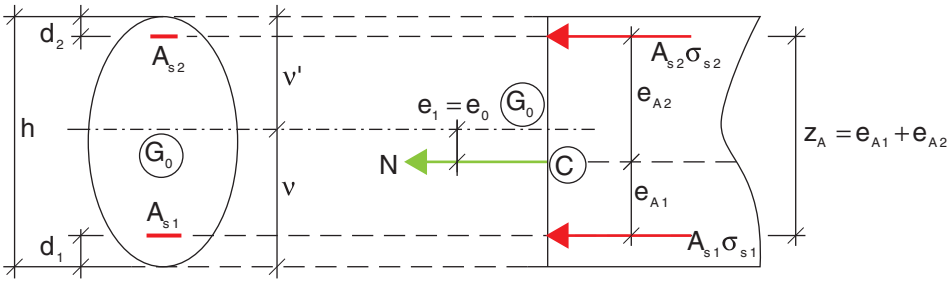
$$\begin{cases} M_{EdG_0} = 1,35.M_g + 1,5.M_q \\ N_{Ed} = 1,35.N_g + 1,5.N_q \\ e_0 = \dfrac{M_{EdG_0}}{N_{Ed}} \end{cases} \qquad \begin{cases} M_{EdG_0} = 1,35.20 + 1,5.20 = 57 \text{ mkN} \\ N_{Ed} = -1,35.200 - 1,5.200 = -570 \text{ kN} \\ e_0 = \dfrac{57}{-570} = -0,10 \text{ m} \end{cases}$$

$$|e_0| >< \frac{h}{2} - d_2 \qquad |e_0| = 0,10 \text{ m} < 0,25 \text{ m} = \frac{0,60}{2} - 0,05$$

$$\Rightarrow \left.\begin{array}{l}\text{centre de pression}\\ \text{entre les armatures}\\ \text{avec } N_{Ed} < 0\end{array}\right\} \Rightarrow \begin{cases}\text{section}\\ \text{entièrement}\\ \text{tendue}\end{cases}$$

3. Armatures

3.1 Introduction



3.2 Excentricités

$$e_{A1} = \frac{h}{2} - d_1 - |e_0| \qquad e_{A1} = \frac{0,60}{2} - 0,05 - 0,10 = 0,15 \text{ m}$$

$$e_{A2} = \frac{h}{2} - d_2 + |e_0| \qquad e_{A2} = \frac{0,60}{2} - 0,05 + 0,10 = 0,35 \text{ m}$$

$$\overline{e_{A1} + e_{A2} = 0,50 \text{ m}}$$

3.3 Armatures

• Nappes inférieures :

$$A_{s1} = \frac{N_{Ed}.e_{A2}}{(e_{A1} + e_{A2})f_{yd}} \qquad A_{s1} = \frac{0,570.0,35}{0,50.435}10^4 = 9,17 \text{ cm}^2$$

• Nappes supérieures :

$$A_{s2} = \frac{N_{Ed}.e_{A1}}{(e_{A1} + e_{A2})f_{yd}} \qquad A_{s2} = \frac{0,570.0,15}{0,50.435}10^4 = 3,93 \text{ cm}^2$$

Total :

$$\overline{A_{s1} + A_{s2} = 13,10 \text{ cm}^2}$$

3.4 Section minimale

$$\begin{cases} M_{serG_0} = M_g + M_q \\ N_{ser} = N_g + N_q \\ e_0 = e_{0ser} = \dfrac{M_{serG_0}}{N_{ser}} \end{cases} \qquad \begin{cases} M_{serG_0} = 20 + 20 = 40 \text{ mkN} \\ N_{ser} = -200 - 200 = -400 \text{ kN} \\ e_0 = e_{0ser} = \dfrac{40}{-400} = -0,10 \text{ m} \end{cases}$$

$\rho = \dfrac{1}{3}$ (section rectangulaire) $\qquad \rho = \dfrac{1}{3}$

$v = v' = \dfrac{h}{2}$ (section rectangulaire) $\qquad v = v' = \dfrac{0,60}{2} = 0,30 \text{ m}$

$$N_f = \frac{\rho.v'}{e_0 - \rho.v'}A_c.f_{ctm} \qquad N_f = \frac{\frac{1}{3}0,30}{-0,10 - \frac{1}{3}0,30}0,30.0,60.2,56 = -0,230 \text{ MN}$$

$$A_{s1} >< A_{s,\,min\,1} = \frac{N_f.e_{A2}}{(e_{A1} + e_{A2})f_{yk}}$$

$$A_{s1} = 9,17\ cm^2 > 3,23\ cm^2 = \frac{0,230.0,35}{0,50.500}10^4 \quad O.K.$$

$$A_2 >< A_{s,\ min\,2} = \frac{N_f.e_{A1}}{(e_{A1}+e_{A2})f_{yk}}$$

$$A_{s2} = 3,93\ cm^2 > 1,38\ cm^2 = \frac{0,230.0,15}{0,50.500}10^4 \quad O.K.$$

3.5 Schéma de ferraillage

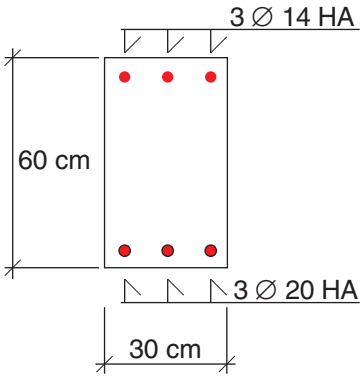
En prenant 3 files verticales :

$\Rightarrow$ Aciers tendus inférieurs :

$3\,\phi\,20$ HA : $A_{s1}=3.3,14=9,42\ cm^2$

$\Rightarrow$ Aciers tendus supérieurs :

$3\,\phi\,14$ HA : $A_{s2}=3.1,54=4,62\ cm^2$



4. Vérification des contraintes à l'ELS

$$\sigma_{s1} = \frac{N_{ser}.e_{A2}}{(e_{A1}+e_{A2})A_{s1}} \qquad \sigma_{s1} = \frac{400.10^{-3}.0,35}{0,50.9,42.10^{-4}} = 297,3\ MPa$$

$$\sigma_{s2} = \frac{N_{ser}.e_{A1}}{(e_{A1}+e_{A2})A_{s2}} \qquad \sigma_{s2} = \frac{400.10^{-3}.0,15}{0,50.4,62.10^{-4}} = 259,7\ MPa$$

$$\sigma_s = Max\begin{Bmatrix}\sigma_{s1}\\ \sigma_{s2}\end{Bmatrix} >< \overline{\sigma_s}$$

$$\sigma_s = Max\begin{Bmatrix}\sigma_{s1} = 297,3\ MPa\\ \sigma_{s2} = 259,7\ MPa\end{Bmatrix} = 297\ MPa < 400\ MPa = \overline{\sigma_s} \quad O.K.$$

ANNEXES

A1 Déformations relatives finales de retrait dans le cas courant d'un béton de classe C25/30

Par définition du retrait, on a[1] :

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} \quad \textbf{(3.8)}$$

avec :
ε_{cd} = déformation due au retrait de dessiccation (mouvements de l'eau libre, donc lente),
ε_{ca} = déformation due au retrait endogène (due au durcissement, donc immédiate),

la déformation finale due au retrait de dessiccation est donnée par :

$$\varepsilon_{cd,\,\infty} = \beta_{ds}\left(\infty, t_s\right).k_h.\varepsilon_{cd,\,0} \quad \textbf{(3.9)}$$

avec :

$$\beta_{ds}\left(\infty, t_s\right) = \frac{\left(t - t_s\right)}{\left(t - t_s\right) + 0,04\sqrt{h_0^3}} = 1 \text{ pour } t \to \infty \quad \textbf{(3.10)}$$

Valeurs de $\varepsilon_{cd,0}$ (‰)

$f_{ck}/f_{ck,\,cube}$	RH (%)						
	20	40	60	80	90	100	Observations
C20/25	0,62	0,58	0,49	0,30	0,17	0	
C40/50	0,48	0,46	0,38	0,24	0,13	0	
C25/30	0,59	0,55	0,46	0,29	0,16	0	Interpolation linéaire

$h_0 = \frac{2A_c}{u}$ (mm)	k_h
100	1,00
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

1. EC 2 – 3.1.4.(6)

La déformation finale due au retrait endogène est donnée par :

$$\varepsilon_{ca,\infty} = 2{,}5\left(f_{ck} - 10\right).10^{-6} \qquad \textbf{(3.12)}$$

ce qui donne, en fonction de la résistance du béton :

$f_{ck}/f_{ck,\,cube}$	$\varepsilon_{cq,\infty}$ (‰)
C20/25	0,025
C40/50	0,075
C25/30	$0{,}0375 \approx 0{,}04$

D'où la déformation finale de retrait :

$\varepsilon_{cs,\infty} = \varepsilon_{cd,\infty} + \varepsilon_{ca,\infty}$ pour un béton courant de classe C25/30.

Humidité relative RH (%)	Rayon moyen $h_0 = \frac{2A_c}{u}$ (mm)											
	≤ 100			200			300			≥ 500		
	$\varepsilon_{cd,\infty}$	$\varepsilon_{ca,\infty}$	$\varepsilon_{cs,\infty}$	$\varepsilon_{cd,\infty}$	$\varepsilon_{ca,\infty}$	$\varepsilon_{cs,\infty}$	$\varepsilon_{cd,\infty}$	$\varepsilon_{ca,\infty}$	$\varepsilon_{cs,\infty}$	$\varepsilon_{cd,\infty}$	$\varepsilon_{ca,\infty}$	$\varepsilon_{cs,\infty}$
20	0,59	0,04	0,63	0,50	0,04	0,54	0,44	0,04	0,48	0,41	0,04	0,45
40	0,55		0,59	0,47		0,51	0,41		0,45	0,39		0,43
60	0,46		0,50	0,39		0,43	0,35		0,39	0,32		0,36
80	0,29		0,33	0,25		0,29	0,22		0,26	0,20		0,24
90	0,16		0,20	0,14		0,18	0,12		0,16	0,11		0,15
100	0		0,04	0		0,04	0		0,04	0		0,04

A2 Flexion simple – Tableaux des moments limites ultimes réduits

Ces tableaux concernent le cas où la contrainte de compression du béton est limitée à l'ELS (classes d'exposition XD, XF et XS).

Les moments limites ultimes réduits sont établis pour les coefficients d'équivalence acier/béton :

$6 \leq \alpha_e \leq 27$

La symbolique pour distinguer les différents types d'aciers utilisés est la suivante :

- S 500 A pour les aciers S 500 de classe de ductilité A avec palier incliné ;
- S 500 B pour les aciers S 500 de classe de ductilité B avec palier incliné ;
- S 500 C pour les aciers S 500 de classe de ductilité C avec palier incliné ;
- S 500 PH pour les aciers S 500 avec palier horizontal, qu'ils soient de classe de ductilité A, B ou C.

1. Diagrammes σ–ε d'aciers à palier incliné

Tableaux des moments réduits $10^4.\mu_{lu}$ (α_e)

$\overline{\sigma_c} = 0{,}6.f_{ck}$	Béton →		C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45
Aciers ↓	γ ↓	α_e ↓						
S 500 A	1,35	6	663	842	1 004	1 193	1 363	1 514
		9	925	1 157	1 363	1 584	1 774	1 938
		12	1 157	1 425	1 651	1 886	2 082	2 246
		15	1 363	1 651	1 886	2 125	2 319	2 479
		18	1 543	1 843	2 082	2 319	2 508	2 660
		21	1 702	2 007	2 246	2 479	2 660	2 806
		24	1 843	2 151	2 387	2 613	2 787	2 924
		27	1 969	2 276	2 507	2 726	2 893	3 023
	1,40	6	710	0900	1 074	1 276	1 454	1 614
		9	988	1 237	1 454	1 687	1886	2 058
		12	1 237	1 520	1 757	2 003	2 207	2 378
		15	1 454	1 757	2 003	2 252	2 453	2 618
		18	1 644	1 958	2 207	2 453	2 648	2 805
		21	1 810	2 130	2 378	2 618	2 805	2 954
		24	1 958	2 279	2 523	2 756	2 934	3 075
		27	2 089	2 409	2 648	2 873	3 042	3 175
	1,45	6	758	0960	1 148	1 360	1 548	1 716
		9	1 055	1 320	1 549	1 793	2 001	2 180
		12	1 320	1 618	1 866	2 123	2 335	2 512
		15	1 549	1 866	2 123	2 382	2 590	2 760
		18	1 747	2 075	2 334	2 590	2 790	2 951
		21	1 922	2 254	2 511	2 760	2 951	3 104
		24	2 075	2 409	2 662	2 901	3 084	3 227
		27	2 212	2 544	2 790	3 021	3 194	3 329
	1,50	6	808	1 022	1 224	1 447	1 645	1 820
		9	1 126	1 405	1 645	1 901	2 118	2 304
		12	1 405	1 717	1 977	2 245	2 465	2 648
		15	1 645	1 977	2 245	2 513	2 728	2 903
		18	1 853	2 196	2 465	2 728	2 935	3 100
		21	2 035	2 382	2 648	2 903	3 100	3 255
		24	2 196	2 542	2 802	3 049	3 235	3 381
		27	2 338	2 681	2 935	3 171	3 348	3 485

$\overline{\sigma_c} = 0{,}6.f_{ck}$	Béton →		C40/50	C45/55	C50/60	C55/67	C60/75	C70/85
Aciers ↓	γ ↓	α_e ↓						
S 500 A	1,35	6	1 651	1 774	1 886	2 049	2 211	2 542
		9	2 082	2 208	2 319	2 491	2 662	3 007
		12	2 387	2 508	2 613	2 786	2 956	3 374
		15	2 613	2 726	2 824	2 994	3 163	4 077
		18	2 787	2 893	2 983	3 149	3 314	4 241
		21	2 924	3 023	3 106	3 269	3 430	4 314
		24	3 035	3 127	3 204	3 363	3 633	4 355
		27	3 127	3 213	3 284	3 440	3 770	4 381
	1,40	6	1 757	1 886	2 003	2 174	2 345	2 693
		9	2 207	2 338	2 453	2 633	2 812	3 174
		12	2 523	2 648	2 756	2 936	3 114	4 500
		15	2 756	2 873	2 972	3 149	3 325	
		18	2 934	3 042	3 134	3 307	3 568	
		21	3 075	3 175	3 259	3 428	3 876	
		24	3 188	3 281	3 359	3 524	4 022	
		27	3 281	3 368	3 440	3 668	4 107	
	1,45	6	1 866	2 001	2 123	2 302	2 481	2 847
		9	2 335	2 470	2 589	2 777	2 964	4 500
		12	2 662	2 790	2 902	3 089	3 274	
		15	2 901	3 021	3 123	3 307	3 706	
		18	3 084	3 194	3 288	3 467	4 165	
		21	3 227	3 329	3 414	3 675	4 311	
		24	3 342	3 436	3 515	3 924	4 381	
		27	3 436	3 524	3 597	4 054	4 423	
	1,50	6	1 977	2 118	2 245	2 433	2 620	3 004
		9	2 465	2 605	2 728	2 924	3 119	4 500
		12	2 802	2 935	3 049	3 243	3 437	
		15	3 049	3 171	3 275	3 466	4 673	
		18	3 235	3 348	3 443	3 927	4 710	
		21	3 381	3 485	3 571	4 229	4 720	
		24	3 498	3 593	3 673	4 350	4 725	
		27	3 593	3 682	3 839	4 413	4 727	

Les cases grisées, avec ou sans valeur indiquée, correspondent à $\mu_{lu} > \mu_{ls}$ (voir § 2.3.1, chapitre 7 : « Flexion simple »).

Pour des bétons de classe supérieure à C70/85, prendre : $\mu_{lu} = \mu_{ls}$.

- C80/95 : $\mu_{lu} = \mu_{ls} = 0{,}3169$;
- C90/105 : $\mu_{lu} = \mu_{ls} = 0{,}3086$.

$\bar{\sigma}_c = 0{,}6.f_{ck}$	Béton →		C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45
Aciers ↓	γ ↓	α_e ↓						
S 500 B	1,35	6	655	842	1 011	1 200	1 369	1 520
		9	929	1 164	1 369	1 590	1 779	1 942
		12	1 164	1 431	1 656	1 890	2 085	2 249
		15	1 369	1 656	1 890	2 129	2 322	2 481
		18	1 548	1 847	2 085	2 322	2 510	2 662
		21	1 706	2 011	2 249	2 481	2 662	2 807
		24	1 847	2 154	2 389	2 614	2 788	2 925
		27	1 972	2 279	2 509	2 728	2 894	3 023
	1,40	6	704	903	1 082	1 283	1 461	1 619
		9	995	1 244	1 461	1 693	1 891	2 061
		12	1 245	1 526	1 762	2 007	2 210	2 380
		15	1 461	1 762	2 007	2 255	2 455	2 620
		18	1 649	1 962	2 210	2 455	2 649	2 806
		21	1 815	2 133	2 380	2 620	2 806	2 955
		24	1 962	2 281	2 525	2 757	2 935	3 075
		27	2 093	2 411	2 649	2 874	3 043	3 176
	1,45	6	755	966	1 156	1 367	1 554	1 721
		9	1 063	1 327	1 554	1 798	2 005	2 183
		12	1 327	1 623	1 870	2 126	2 337	2 514
		15	1 554	1 870	2 126	2 384	2 592	2 761
		18	1 752	2 079	2 337	2 592	2 792	2 952
		21	1 926	2 258	2 514	2 761	2 952	3 104
		24	2 079	2 412	2 663	2 902	3 085	3 228
		27	2 215	2 546	2 791	3 022	3 195	3 329
	1,50	6	807	1 031	1 231	1 454	1 650	1 825
		9	1 134	1 411	1 650	1 905	2 121	2 307
		12	1 411	1 723	1 981	2 248	2 467	2 650
		15	1 650	1 981	2 248	2 516	2 730	2 905
		18	1 863	2 199	2 467	2 730	2 936	3 101
		21	2 039	2 384	2 650	2 905	3 101	3 256
		24	2 199	2 544	2 804	3 050	3 236	3 381
		27	2 341	2 682	2 936	3 172	3 348	3 485

$\overline{\sigma_c} = 0{,}6.f_{ck}$	Béton →		C40/50	C45/55	C50/60	C55/67	C60/75	C70/85
Aciers ↓	γ ↓	α_e ↓						
S 500 B	1,35	6	1 656	1 779	1 890	2 052	2 214	2 543
		9	2 085	2 210	2 322	2 493	2 663	3 008
		12	2 389	2 510	2 614	2 787	2 957	3 374
		15	2 614	2 728	2 825	2 995	3 163	4 077
		18	2 788	2 894	2 983	3 150	3 315	
		21	2 925	3 025	3 106	3 269	3 430	
		24	3 036	3 128	3 205	3 364	3 633	
		27	3 128	3 213	3 285	3 440	3 770	
	1,40	6	1 762	1 891	2 007	2 177	2 347	2 694
		9	2 210	2 340	2 455	2 635	2 813	3 174
		12	2 525	2 649	2 757	2 937	3 115	4 500
		15	2 757	2 874	2 973	3 150	3 325	
		18	2 935	3 043	3 135	3 307	3 568	
		21	3 075	3 176	3 260	3 428	3 876	
		24	3 189	3 282	3 359	3 524	4 022	
		27	3 282	3 368	3 440	3 668	4 107	
	1,45	6	1 870	2 005	2 126	2 305	2 483	2 847
		9	2 337	2 472	2 592	2 779	2 965	4 688
		12	2 663	2 792	2 902	3 089	3 275	
		15	2 902	3 022	3 123	3 307	3 706	
		18	3 085	3 195	3 288	3 467	4 165	
		21	3 228	3 329	3 415	3 675	4 311	
		24	3 342	3 437	3 515	3 924	4 381	
		27	3 437	3 524	3 597	4 054	4 423	
	1,50	6	1 981	2 121	2 248	2 435	2 622	3 005
		9	2 467	2 607	2 730	2 925	3 119	4 688
		12	2 804	2 936	3 050	3 244	3 437	
		15	3 050	3 172	3 276	3 466	4 673	
		18	3 236	3 348	3 443	3 927	4 710	
		21	3 381	3 485	3 571	4 229	4 720	
		24	2 498	3 594	3 673	4 350	4 725	
		27	3 594	3 682	3 839	4 413	4 727	

Les cases grisées, avec ou sans valeur indiquée, correspondent à $\mu_{lu} > \mu_{ls}$ (voir § 2.3.1, chapitre 7 : « Flexion simple »).

Pour des bétons de classe supérieure à C70/85, prendre : $\mu_{lu} = \mu_{ls}$.

- C80/95 : $\mu_{lu} = \mu_{ls} = 0{,}3169$;
- C90/105 : $\mu_{lu} = \mu_{ls} = 0{,}3086$.

$\overline{\sigma_c} = 0{,}6.f_{ck}$	Béton →		C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45
Aciers ↓	γ ↓	α_e ↓						
S 500 C	1,35	6	647	835	1 005	1 195	1 364	1 516
		9	922	1 159	1 364	1 586	1 775	1 939
		12	1 159	1 427	1 652	1 887	2 082	2 247
		15	1 364	1 652	1 887	2 126	2 320	2 479
		18	1 544	1 844	2 082	2 320	2 508	2 661
		21	1 703	2 008	2 247	2 479	2 661	2 806
		24	1 844	2 151	2 387	2 613	2 787	2 924
		27	1 969	2 277	2 508	2 727	2 893	3 023
	1,40	6	697	897	1 076	1 278	1 456	1 615
		9	989	1 239	1 456	1 689	1 887	2 059
		12	1 239	1 522	1 758	2 004	2 208	2 378
		15	1 456	1 758	2 004	2 253	2 454	2 619
		18	1 645	1 959	2 208	2 454	2 648	2 805
		21	1 811	2 131	2 378	2 619	2 805	2 954
		24	1 959	2 279	2 523	2 756	2 935	3 075
		27	2 090	2 409	2 648	2 873	3 043	3 175
	1,45	6	748	960	1 150	1 362	1 550	1 717
		9	1 057	1 322	1 550	1 794	2 002	2 180
		12	1 322	1 619	1 867	2 124	2 335	2 512
		15	1 550	1 867	2 124	2 382	2 590	2 760
		18	1 748	2 076	2 335	2 590	2 790	2 952
		21	1 923	2 255	2 512	2 760	2 952	3 104
		24	2 076	2 410	2 662	2 902	3 084	3 227
		27	2 213	2 544	2 790	3 021	3 194	3 329
	1,50	6	800	1 024	1 225	1 449	1 646	1 822
		9	1 128	1 407	1 646	1 902	2 119	2 305
		12	1 406	1 719	1 978	2 246	2 465	2 648
		15	1 646	1 978	2 246	2 514	2 729	2 904
		18	1 854	2 196	2 465	2 729	2 935	3 100
		21	2 036	2 382	2 648	2 904	3 100	3 256
		24	2 196	2 542	2 803	3 049	3 235	3 381
		27	2 338	2 681	2 935	3 171	3 348	3 485

$\overline{\sigma_c} = 0{,}6.f_{ck}$	Béton →		C40/50	C45/55	C50/60	C55/67	C60/75	C70/85
Aciers ↓	γ ↓	α_e ↓						
S 500 C	1,35	6	1 652	1 775	1 887	2 050	2 212	2 542
		9	2 082	2 208	2 320	2 492	2 662	3 007
		12	2 387	2 508	2 613	2 786	2 957	3 374
		15	2 613	2 727	2 824	2 994	3 163	4 077
		18	2 787	2 893	2 983	3 149	3 314	4 241
		21	2 924	3 023	3 106	3 269	3 430	4 314
		24	3 036	3 127	3 204	3 363	3 633	4 355
		27	3 127	3 213	3 284	3 440	3 770	4 381
	1,40	6	1 758	1 887	2 004	2 175	2 345	2 542
		9	2 208	2 338	2 454	2 634	2 812	3 007
		12	2 523	2 648	2 756	2 936	3 114	3 374
		15	2 756	2 873	2 973	3 150	3 325	4 077
		18	2 935	3 043	3 134	3 307	3 568	
		21	3 075	3 175	3 260	3 428	3 876	
		24	3 188	3 281	3 359	3 524	4 022	
		27	3 281	3 368	3 440	3 668	4 107	
	1,45	6	1 867	2 002	2 124	2 303	2 482	2 847
		9	2 335	2 471	2 590	2 778	2 964	4 500
		12	2 662	2 790	2 902	3 089	3 274	
		15	2 902	3 021	3 123	3 307	3 706	
		18	3 084	3 194	3 288	3 467	4 165	
		21	3 227	3 329	3 415	3 675	4 311	
		24	3 342	3 437	3 515	3 924	4 381	
		27	3 437	3 524	3 597	4 054	4 423	
	1,50	6	1 978	2 119	2 246	2 433	2 621	3 004
		9	2 465	2 605	2 729	2 924	3 119	4 500
		12	2 803	2 935	3 049	3 244	3 437	
		15	3 049	3 171	3 275	3 466	4 673	
		18	3 235	3 348	3 443	3 927	4 710	
		21	3 381	3 485	3 571	4 229	4 720	
		24	3 498	3 593	3 673	4 350	4 725	
		27	3 593	3 682	3 839	4 413	4 747	

Les cases grisées, avec ou sans valeur indiquée, correspondent à $\mu_{lu} > \mu_{ls}$ (voir § 2.3.1, chapitre 7 : « Flexion simple »).

Pour des bétons de classe supérieure à C70/85, prendre : $\mu_{lu} = \mu_{ls}$.

- C80/95 : $\mu_{lu} = \mu_{ls} = 0{,}3169$;
- C90/105 : $\mu_{lu} = \mu_{ls} = 0{,}3086$.

2. Diagrammes σ–ε d'aciers à palier horizontal

Tableaux des moments réduits $10^4.\mu_{lu}$ (α_e)

$\overline{\sigma_c} = 0{,}6.f_{ck}$	Béton →		C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45
Aciers ↓	γ ↓	α_e ↓						
S 500 PH	1,35	6	688	872	1 038	1 224	1 390	1 538
		9	957	1 188	1 390	1 607	1 793	1 955
		12	1 188	1 451	1 672	1 903	2 096	2 258
		15	1 390	1 672	1 903	2 139	2 330	2 488
		18	1 566	1 861	2 096	2 330	2 516	2 667
		21	1 722	2 023	2 258	2 448	2 667	2 811
		24	1 861	2 164	2 396	2 620	2 792	2 928
		27	1 984	2 287	2 516	2 732	2 897	3 026
	1,40	6	744	932	1 108	1 305	1 480	1 637
		9	1 022	1 268	1 480	1 709	1 904	2 073
		12	1 268	1 545	1 777	2 019	2 220	2 388
		15	1 480	1 777	2 019	2 265	2 463	2 626
		18	1 666	1 975	2 220	2 463	2 655	2 810
		21	1 830	2 144	2 388	2 626	2 811	2 958
		24	1 975	2 291	2 532	2 762	2 939	3 078
		27	2 104	2 419	2 655	2 878	3 046	3 178
	1,45	6	787	991	1 180	1 389	1 573	1 737
		9	1 090	1 349	1 573	1 813	2 017	2 193
		12	1 349	1 641	1 885	2 138	2 346	2 521
		15	1 573	1 885	2 138	2 393	2 598	2 766
		18	1 768	2 091	2 346	2 598	2 796	2 956
		21	1 939	2 267	2 521	2 766	2 956	3 107
		24	2 091	2 420	2 669	2 906	3 087	3 229
		27	2 226	2 552	2 796	3 025	3 197	3 331
	1,50	6	838	1 058	1 255	1 474	1 668	1 840
		9	1 159	1 433	1 668	1 920	2 133	2 316
		12	1 433	1 739	1 995	2 258	2 475	2 656
		15	1 668	1 994	2 258	2 523	2 735	2 909
		18	1 873	2 210	2 475	2 735	2 940	3 104
		21	2 052	2 393	2 656	2 909	3 104	3 258
		24	2 210	2 551	2 809	3 053	3 238	3 383
		27	2 350	2 688	2 940	3 174	3 350	3 486

$\overline{\sigma_c} = 0{,}6.f_{ck}$	Béton →		C40/50	C45/55	C50/60	C55/67	C60/75	C70/85
Aciers ↓	γ ↓	α_e ↓						
S 500 PH	1,35	6	1 672	1 793	1 903	2 062	2 221	2 546
		9	2 096	2 220	2 330	2 498	2 667	3 009
		12	2 396	2 516	2 620	2 790	2 959	3 374
		15	2 620	2 732	2 829	2 997	3 164	4 077
		18	2 792	2 897	2 986	3 151	3 315	4 241
		21	2 928	3 026	3 108	3 270	3 430	
		24	3 039	3 130	3 206	3 364	3 633	
		27	3 130	3 215	3 286	3 441	3 770	
	1,40	6	1 777	1 904	2 019	2 186	2 353	2 696
		9	2 220	2 349	2 463	2 639	2 815	3 175
		12	2 532	2 655	2 762	2 941	3 116	4 549
		15	2 762	2 878	2 977	3 151	3 325	4 622
		18	2 939	3 046	3 137	3 308	3 568	
		21	3 078	3 178	3 261	3 429	3 876	
		24	3 190	3 283	3 360	3 524	4 022	
		27	3 283	3 369	3 441	3 668	4 107	
	1,45	6	1 885	2 017	2 138	2 313	2 488	2 850
		9	2 346	2 480	2 598	2 782	2 967	
		12	2 669	2 796	2 906	3 091	3 275	
		15	2 906	3 025	3 126	3 308	3 706	
		18	3 087	3 197	3 290	3 467	4 165	
		21	3 229	3 331	3 416	3 675	4 311	
		24	3 344	3 438	3 516	3 924		
		27	3 438	3 525	3 597	4 054	4 423	
	1,50	6	1 995	2 133	2 258	2 442	2 626	3 006
		9	2 475	2 614	2 735	2 928	3 121	
		12	2 809	2 940	3 053	3 245	3 437	
		15	3 053	3 174	3 277	3 466	4 673	
		18	3 238	3 350	3 444	3 927		
		21	3 383	3 486	3 572	4 229		
		24	3 499	3 594	3 673	4 350		
		27	3 594	3 682	3 839	4 413		

Les cases grisées, avec ou sans valeur indiquée, correspondent à $\mu_{lu} > \mu_{ls}$ (voir § 2.3.1, chapitre 7 : « Flexion simple »).

Pour des bétons de classe supérieure à C70/85, prendre : $\mu_{lu} = \mu_{ls}$.

- C80/95 : $\mu_{lu} = \mu_{ls} = 0{,}3169$;
- C90/105 : $\mu_{lu} = \mu_{ls} = 0{,}3086$.

A3 Flexion composée – Moment limite ultime

1. Introduction

On se place dans le cas où la contrainte de compression du béton est limitée (classes d'exposition XD, XF et XS).

Comme la sollicitation de flexion composée est une sollicitation vectorielle, et que les coefficients de pondération des actions ne sont pas nécessairement les mêmes pour le moment et pour l'effort normal, il n'est pas possible de savoir de façon simple, a priori, s'il faut ou non, prévoir des aciers comprimés.

En particulier, étant donné le nombre de paramètres en jeu, il n'est pas possible d'établir des tableaux comme ceux du § 2.3, chapitre 7 : « Flexion simple ».

En posant : $\nu_u = \dfrac{N_{Ed}}{b_w.d.f_{cu}}$, $\gamma_N = \dfrac{N_{Ed}}{N_{ser}}$, $\mu_{cu} = \dfrac{M_{EdA}}{b_w.d^2.f_{cu}}$ et $\gamma_M = \dfrac{M_{EdA}}{M_{serA}}$, on peut, moyennant un programme de calcul approprié, dresser des tableaux qui donnent, en fonction de f_{ck}, α_e, f_{yk}, ν_u, γ_M et γ_N, les valeurs limites μ_{lu} de μ_{cu} au-delà desquelles la contrainte limite de compression du béton en service serait dépassée, c'est-à-dire au-delà desquelles il devient nécessaire de prévoir des aciers comprimés.

Les tableaux correspondants, établis pour des aciers S 500 et diverses valeurs de f_{ck} $(\leq 35$ MPa$)$ et de α_e figurent au § 4 ci-après.

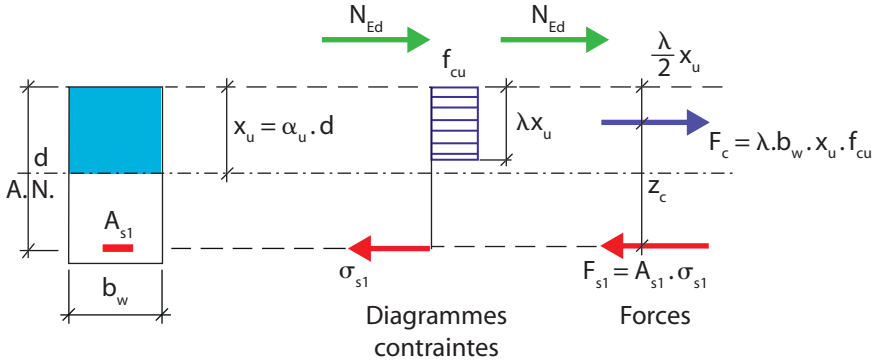
La symbolique pour distinguer les différents types d'aciers utilisés est la suivante :

- S 500 A pour les aciers S 500 de classe de ductilité A avec palier incliné ;
- S 500 B pour les aciers S 500 de classe de ductilité B avec palier incliné ;
- S 500 C pour les aciers S 500 de classe de ductilité C avec palier incliné ;
- S 500 PH pour les aciers S 500 avec palier horizontal, qu'ils soient de classe de ductilité A, B ou C.

2. Équations utilisées

2.1 Équilibre des forces à l'ELU

L'équilibre des forces à l'ELU s'écrit :



$$N_{Ed} = \lambda.b_w.x_u.f_{cu} - A_{s1}.\sigma_{s1} \quad \Rightarrow \quad A_{s1} = \lambda.b_w.x_u\frac{f_{cu}}{\sigma_{s1}} - \frac{N_{Ed}}{\sigma_{s1}}$$

avec : $x_u = \alpha_u.d = \frac{1}{\lambda}\left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{cu}}\right]d$

$$\Rightarrow \quad A_{s1} = \left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{cu}}\right]b_w.d\frac{f_{cu}}{\sigma_{s1}} - \frac{N_{Ed}}{\sigma_{s1}}$$

D'où le pourcentage géométrique d'armatures :

$$\rho_s = \frac{A_{s1}}{b_w.d} = \left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{cu}}\right]\frac{f_{cu}}{\sigma_{s1}} - \frac{N_{Ed}}{b_w.d.\sigma_{s1}}$$

$$\rho_s = \left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{cu}}\right]\frac{f_{cu}}{\sigma_{s1}} - \nu_u\frac{f_{cu}}{\sigma_{s1}}$$

$$\rho_s = \left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{cu}} - \nu_u\right]\frac{f_{cu}}{\sigma_{s1}} \quad \text{avec : } f_{cu} = \eta.\alpha_{cc}\frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

$$\rho_s = \left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{cu}} - \nu_u\right]\frac{\eta.\alpha_{cc}.f_{ck}}{\gamma_c.\sigma_{s1}}$$

$$\rho_s = \left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{cu}} - \nu_u\right]\frac{\eta.\alpha_{cc}}{\gamma_c}.\frac{f_{ck}}{\sigma_{s1}} \qquad [1]$$

Remarque

Pour que le pourcentage géométrique d'armatures soit positif, il faut que :

$$\rho_s > 0 \Rightarrow 1 - \sqrt{1 + 2.\mu_{cu}} - \nu_u > 0 \Rightarrow \mu_{cu} > \mu_{cu,\,lim} = \frac{1 - (1 - \nu_u)^2}{2}$$

ce qui conduit aux valeurs limites :

ν_u	$\mu_{cu,\,lim}$
0,05	0,04875
0,10	0,09500
0,15	0,13875
0,20	0,18000
0,25	0,21875
0,30	0,25500

Lorsque $\rho_s \leq 0$, l'équilibre peut être obtenu par la seule résistance du béton sans aciers tendus.

2.2 Effort normal réduit de service

On pose :

$\nu_s = \dfrac{N_{ser}}{b_w.d.\overline{\sigma_c}} = \dfrac{N_{ser}}{b_w.d.k_1.f_{ck}}$ avec $k_1 = 0,6$: valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française.

Comme :

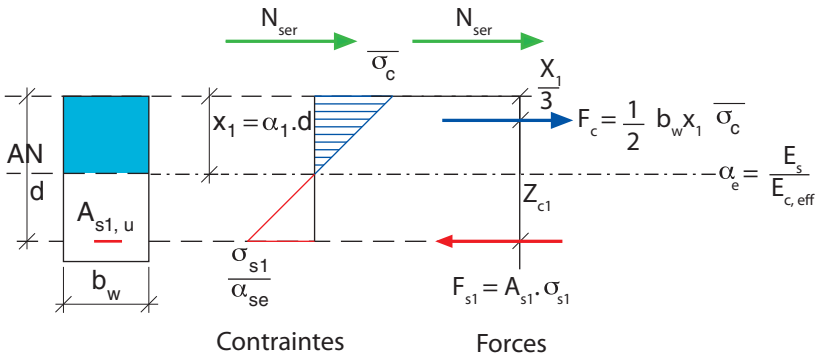
$$\nu_u = \frac{N_{Ed}}{b_w.d.f_{cu}} = \frac{N_{Ed}.\gamma_c}{b_w.d.\eta.\alpha_{cc}.f_{ck}} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{b_w.d.f_{ck}} = \nu_u \frac{1}{N_{Ed}}.\frac{\eta.\alpha_{cc}}{\gamma_c}$$

il vient :

$$\nu_s = \nu_u \frac{N_{ser}}{N_{Ed}}.\frac{\eta.\alpha_{cc}}{k_1.\gamma_c}$$

$$\nu_s = \frac{\nu_u}{\gamma_N}.\frac{\eta.\alpha_{cc}}{k_1.\gamma_c} \qquad [2]$$

2.3 Équilibre des forces à l'ELS



$$\frac{\frac{\sigma_{s1}}{\alpha_e}}{d - x_1} = \frac{\overline{\sigma_c}}{x_1} \Rightarrow \sigma_{s1} = \alpha_e.\overline{\sigma_c}\,\frac{d - x_1}{x_1}$$

$$x_1 = \alpha_1.d$$

L'équilibre des forces à l'ELS s'écrit :

$$F_c - F_{s1} = N_{ser}$$

$$\frac{1}{2} b_w.\alpha_1.d.\overline{\sigma_c} - \alpha_e.A_{s1}.\overline{\sigma_c}\,\frac{d - \alpha_1.d}{\alpha_1.d} = N_{ser}$$

$$\frac{1}{2}\alpha_1 - \alpha_e\,\frac{A_{s1}}{b_w.d}.\frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1} = \frac{N_{ser}}{b_w.d.\overline{\sigma_c}} = \nu_s$$

Soit, en fonction du pourcentage géométrique d'armatures :

$$\alpha_1^2 - 2.\alpha_e\rho_s\left(1 - \alpha_1\right) - 2.\nu_s.\alpha_1 = 0$$

$$\alpha_1^2 + \left(2.\alpha_e.\rho_s - 2.\nu_s\right)\alpha_1 - 2.\alpha_e.\rho_s = 0$$

équation du second degré dont la solution positive est :

$$\Delta = \left(\alpha_e.\rho_s - \nu_s\right)^2 + 2.\alpha_e.\rho_s$$

$$\alpha_1 = \nu_s - \alpha_e.\rho_s + \sqrt{\left(\nu_s - \alpha_e\rho_s\right)^2 + 2.\alpha_e.\rho_s} \qquad [3]$$

2.4 Moment réduit de service

Le moment des forces internes par rapport aux aciers tendus a pour expression :

$M_{serA} = F_c.z_{c1}$

$$M_{serA} = \frac{1}{2} b_w.\alpha_1.d.\overline{\sigma_c}\left(d - \frac{\alpha_1.d}{3}\right) = \frac{\alpha_1}{2}\left(1 - \frac{\alpha_1}{3}\right) b_w.d^2.\overline{\sigma_c}$$

On pose :

$$\mu_s = \frac{M_{serA}}{b_w.d^2.\overline{\sigma_c}} \quad \Rightarrow \quad \mu_s = \frac{\alpha_1}{2}\left(1 - \frac{\alpha_1}{3}\right) \qquad [4]$$

2.5 Moment réduit ultime

On pose :

$$\mu_{cu} = \frac{M_{EdA}}{b_w.d^2.f_{cu}} = \frac{\gamma_M.M_{serA}}{b_w.d^2\,\dfrac{\eta.\alpha_{cc}.f_{ck}}{\gamma_c}}$$

D'où, en fonction du moment réduit de service :

$$\mu_{cu} = \gamma_M \frac{\gamma_c}{\eta.\alpha_{cc}}.\frac{M_{serA}}{b_w.d^2\,\dfrac{\overline{\sigma_c}}{k_1}}$$ avec $k_1 = 0,6$: valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française.

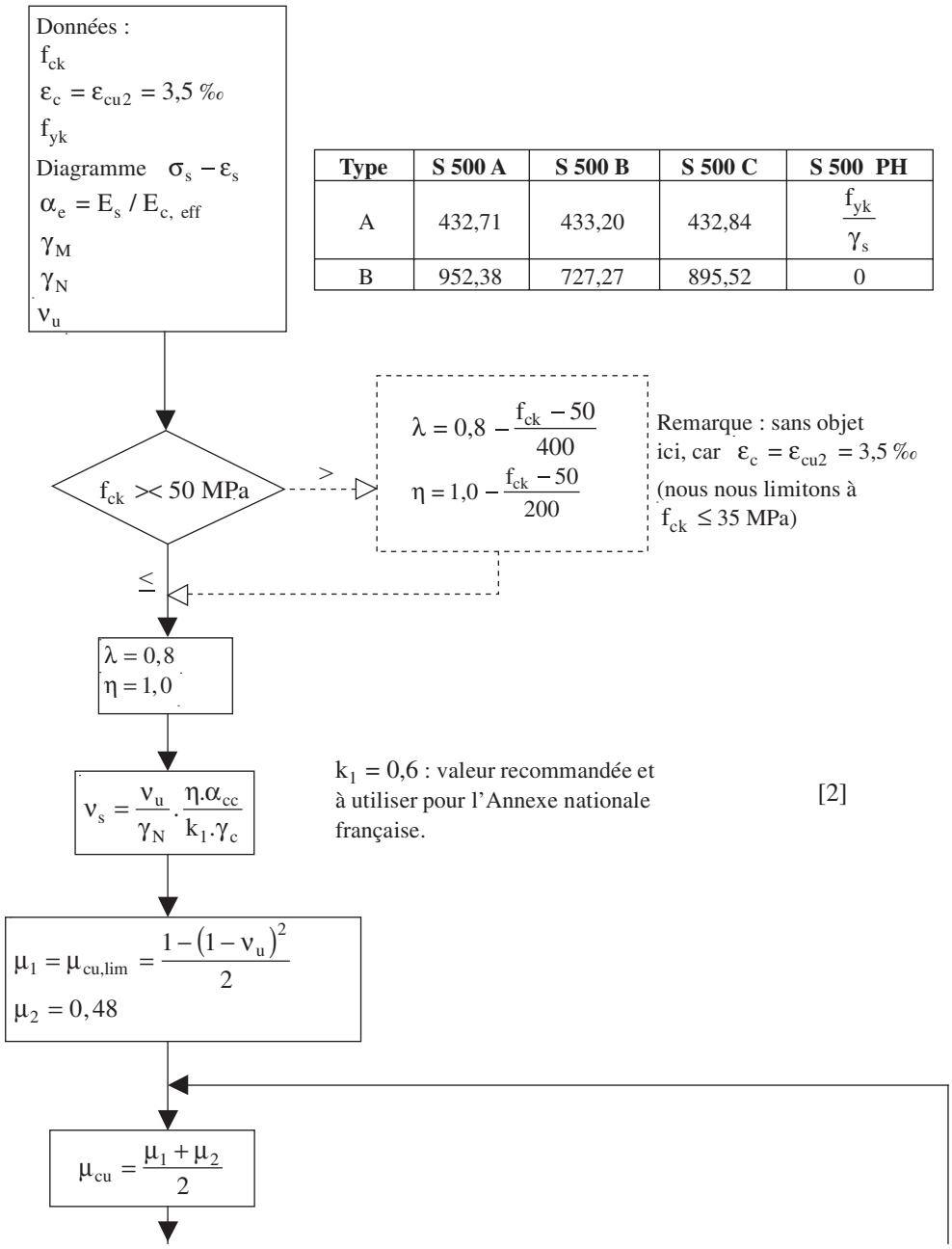
$$\mu_{cu} = \mu_s.\gamma_M \frac{k_1.\gamma_c}{\eta.\alpha_{cc}} \qquad [5]$$

2.6 Principe du calcul

Pour f_{ck}, f_{yk}, α_e, $\gamma_M = \dfrac{M_{EdA}}{M_{serA}}$, $\gamma_N = \dfrac{N_{Ed}}{N_{ser}}$, $\nu_u = \dfrac{N_{Ed}}{b_w.d.f_{cu}}$ et $\mu_{cu} = \mu_{lim}$ choisis a priori, le processus de calcul s'établit comme indiqué ci-dessous :

1/ L'équation [1] donne le pourcentage géométrique d'armatures correspondant, à l'ELU, à la valeur de départ choisie pour μ_{lim}.
2/ L'équation [3] permet, en adoptant pour l'ELS le pourcentage géométrique déterminé lors de l'étape précédente, de calculer la position de l'axe neutre à l'ELS.
3/ Pour cette position de l'axe neutre, l'équation [4] donne le moment réduit de service μ_s.
4/ À μ_s correspond, par l'équation [5], une nouvelle valeur μ_{cu} du moment limite ultime avec laquelle on recommence le processus.
5/ Le moment limite ultime réduit en flexion composée cherché est obtenu lorsque la valeur résultant de l'étape n correspond à celle introduite à l'étape n – 1.

3. Organigramme de calcul



Type	S 500 A	S 500 B	S 500 C	S 500 PH
A	432,71	433,20	432,84	$\frac{f_{yk}}{\gamma_s}$
B	952,38	727,27	895,52	0

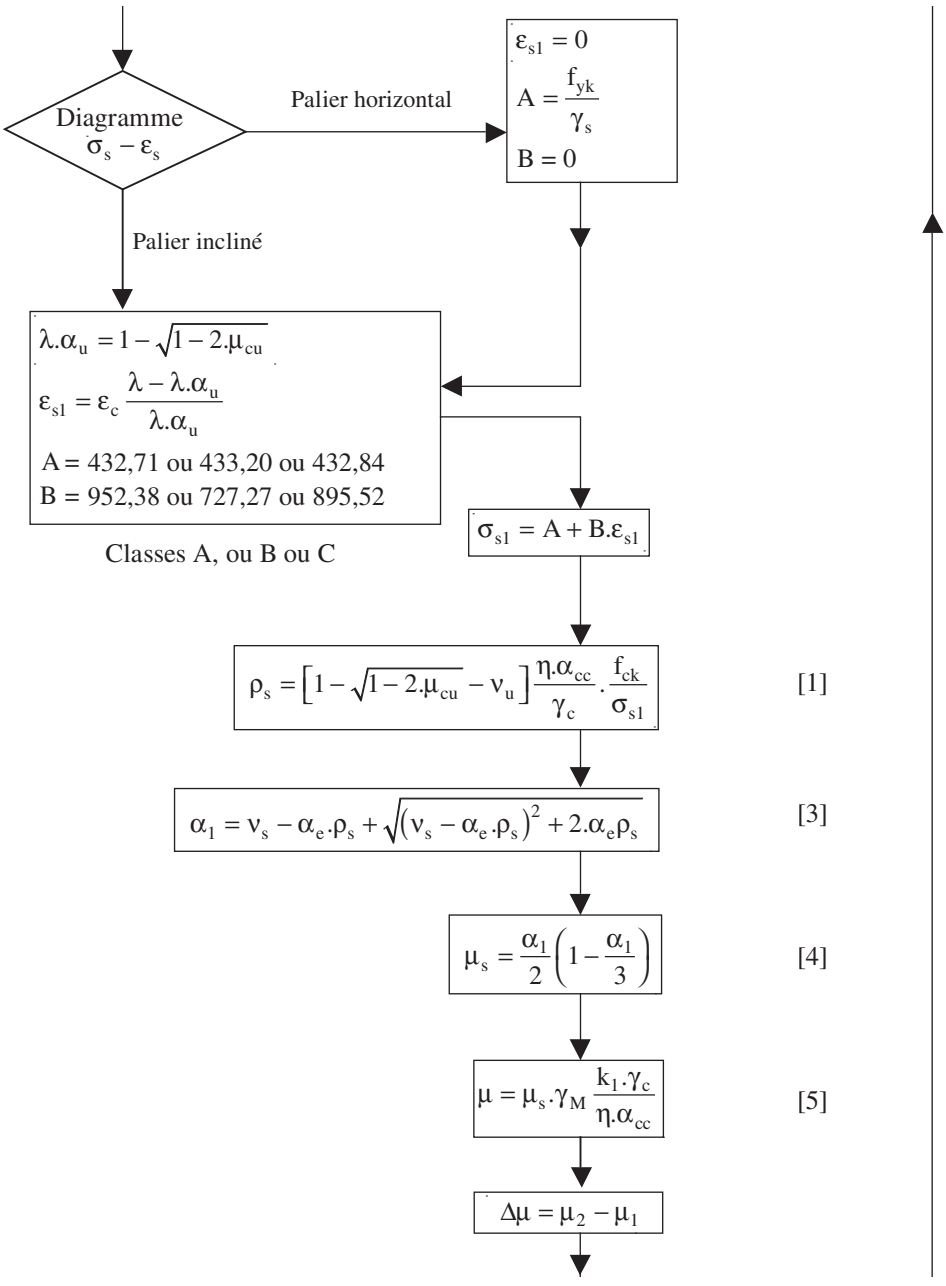
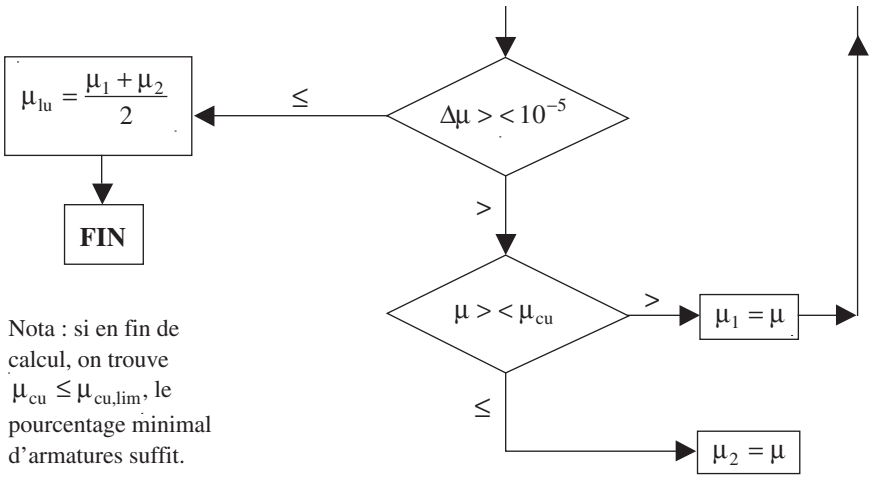


Diagramme
$\sigma_s - \varepsilon_s$
Palier horizontal
$\varepsilon_{s1} = 0$
$A = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$
$B = 0$
Palier incliné
$\lambda.\alpha_u = 1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{cu}}$
$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_c \frac{\lambda - \lambda.\alpha_u}{\lambda.\alpha_u}$
A = 432,71 ou 433,20 ou 432,84
B = 952,38 ou 727,27 ou 895,52
Classes A, ou B ou C
$\sigma_{s1} = A + B.\varepsilon_{s1}$
$\rho_s = \left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{cu}} - \nu_u\right] \frac{\eta.\alpha_{cc}}{\gamma_c} . \frac{f_{ck}}{\sigma_{s1}}$
[1]
$\alpha_1 = \nu_s - \alpha_e.\rho_s + \sqrt{(\nu_s - \alpha_e.\rho_s)^2 + 2.\alpha_e\rho_s}$
[3]
$\mu_s = \frac{\alpha_1}{2}\left(1 - \frac{\alpha_1}{3}\right)$
[4]
$\mu = \mu_s.\gamma_M \frac{k_1.\gamma_c}{\eta.\alpha_{cc}}$
[5]
$\Delta\mu = \mu_2 - \mu_1$



Nota : si en fin de calcul, on trouve $\mu_{cu} \leq \mu_{cu,lim}$, le pourcentage minimal d'armatures suffit.

4. Tableaux des moments limites ultimes en flexion composée

Les valeurs de $10^4 \mu_{lu}$ figurent dans les tableaux ci-après.

Les paramètres d'entrée dans les tableaux sont les suivants :

- type d'aciers (S 500 A, S 500 B, S 500 C, S 500 PH) ;
- résistance caractéristique à la compression du béton : $25 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 35 \text{ MPa}$;
- coefficient d'équivalence : $6 \leq \alpha_e \leq 27$.

Les valeurs grisées correspondent à $\mu_{lu} = \mu_{ls}$ (voir § 2.3, chapitre 7 : « Flexion simple »).

Les cases sans valeurs numériques ou avec arrière-plan jaune correspondent au cas où la notion de moment limite n'a plus de sens, le béton pouvant résister seul, sans armatures tendues.

Les lignes pour lesquelles $\nu_u = 0$, en haut de chaque tableau, correspondent à la flexion simple.

μ_{lu} pour S 500 A ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 6

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1193	0,1276	0,1360	0,1447	0,1536	0,1627	0,1721	0,1816	0,1914	0,2014
0,05	1,00	0,1370	0,1469	0,1570	0,1673	0,1777	0,1882	0,1990	0,2099	0,2210	0,2323
	1,05	0,1339	0,1439	0,1540	0,1642	0,1746	0,1852	0,1959	0,2069	0,2180	0,2292
	1,10	0,1310	0,1411	0,1512	0,1615	0,1719	0,1824	0,1932	0,2041	0,2152	0,2264
	1,15	0,1283	0,1384	0,1486	0,1589	0,1693	0,1799	0,1906	0,2015	0,2126	0,2239
	1,20	0,1258	0,1359	0,1462	0,1565	0,1669	0,1775	0,1882	0,1991	0,2102	0,2215
	1,25	0,1234	0,1336	0,1439	0,1542	0,1647	0,1753	0,1860	0,1969	0,2080	0,2193
	1,30	0,1211	0,1314	0,1417	0,1521	0,1626	0,1732	0,1839	0,1949	0,2059	0,2172
	1,35	0,1189	0,1293	0,1397	0,1501	0,1606	0,1713	0,1820	0,1929	0,2040	0,2153
	1,40	0,1168	0,1273	0,1378	0,1482	0,1588	0,1694	0,1802	0,1911	0,2022	0,2135
	1,45	0,1148	0,1254	0,1359	0,1465	0,1570	0,1677	0,1785	0,1894	0,2005	0,2118
	1,50	0,1129	0,1236	0,1342	0,1448	0,1554	0,1661	0,1769	0,1878	0,1989	0,2102
0,1	1,00	0,1681	0,1791	0,1902	0,2015	0,2129	0,2245	0,2362	0,2481	0,2602	0,2725
	1,05	0,1615	0,1726	0,1839	0,1952	0,2066	0,2182	0,2300	0,2419	0,2540	0,2662
	1,10	0,1550	0,1663	0,1777	0,1892	0,2007	0,2123	0,2241	0,2361	0,2482	0,2604
	1,15	0,1485	0,1602	0,1718	0,1834	0,1950	0,2068	0,2186	0,2306	0,2427	0,2550
	1,20	0,1419	0,1541	0,1660	0,1778	0,1896	0,2014	0,2133	0,2254	0,2375	0,2498
	1,25	0,1350	0,1479	0,1603	0,1724	0,1843	0,1963	0,2083	0,2204	0,2327	0,2450
	1,30	0,1272	0,1415	0,1545	0,1670	0,1792	0,1914	0,2035	0,2157	0,2280	0,2404
	1,35	0,1168	0,1346	0,1487	0,1617	0,1743	0,1866	0,1989	0,2112	0,2236	0,2361
	1,40	0,0867	0,1264	0,1425	0,1563	0,1693	0,1820	0,1945	0,2069	0,2194	0,2319
	1,45		0,0851	0,1356	0,1508	0,1644	0,1774	0,1902	0,2028	0,2153	0,2280
	1,50			0,1270	0,1449	0,1595	0,1729	0,1859	0,1987	0,2115	0,2242
0,15	1,00	0,2075	0,2190	0,2308	0,2426	0,2547	0,2669	0,2793	0,2918	0,3046	0,3176
	1,05	0,1986	0,2103	0,2220	0,2339	0,2460	0,2582	0,2705	0,2831	0,2958	0,3088
	1,10	0,1899	0,2017	0,2135	0,2255	0,2376	0,2498	0,2622	0,2748	0,2875	0,3005
	1,15	0,1812	0,1932	0,2052	0,2173	0,2295	0,2418	0,2543	0,2669	0,2796	0,2926
	1,20	0,1722	0,1846	0,1970	0,2093	0,2216	0,2341	0,2466	0,2593	0,2721	0,2851
	1,25	0,1626	0,1758	0,1886	0,2013	0,2139	0,2265	0,2392	0,2520	0,2649	0,2779
	1,30	0,1513	0,1662	0,1800	0,1932	0,2062	0,2191	0,2319	0,2449	0,2579	0,2710
	1,35	0,1378	0,1549	0,1706	0,1848	0,1983	0,2116	0,2248	0,2379	0,2511	0,2643
	1,40	0,1337	0,1382	0,1595	0,1757	0,1903	0,2041	0,2177	0,2311	0,2445	0,2579
	1,45	0,1288	0,1338	0,1385	0,1650	0,1816	0,1964	0,2105	0,2243	0,2380	0,2516
	1,50	0,1215	0,1284	0,1339	0,1467	0,1716	0,1882	0,2032	0,2175	0,2315	0,2454
0,2	1,00	0,2481	0,2602	0,2725	0,2850	0,2976	0,3103	0,3233	0,3365	0,3498	0,3634
	1,05	0,2381	0,2501	0,2624	0,2747	0,2873	0,3000	0,3129	0,3260	0,3393	0,3528
	1,10	0,2282	0,2403	0,2525	0,2649	0,2774	0,2901	0,3030	0,3160	0,3293	0,3427
	1,15	0,2185	0,2306	0,2429	0,2553	0,2678	0,2805	0,2934	0,3064	0,3197	0,3331
	1,20	0,2087	0,2210	0,2334	0,2459	0,2585	0,2712	0,2841	0,2972	0,3104	0,3239
	1,25	0,1987	0,2113	0,2239	0,2365	0,2493	0,2621	0,2751	0,2882	0,3015	0,3150
	1,30	0,1879	0,2011	0,2141	0,2271	0,2401	0,2531	0,2662	0,2794	0,2928	0,3063
	1,35	0,1787	0,1901	0,2039	0,2174	0,2308	0,2441	0,2574	0,2708	0,2843	0,2980
	1,40	0,1746	0,1792	0,1927	0,2072	0,2212	0,2350	0,2486	0,2623	0,2760	0,2897
	1,45	0,1705	0,1751	0,1797	0,1957	0,2110	0,2255	0,2397	0,2537	0,2677	0,2816
	1,50	0,1661	0,1708	0,1755	0,1809	0,1994	0,2154	0,2304	0,2450	0,2593	0,2736
0,25	1,00	0,2867	0,2995	0,3124	0,3254	0,3386	0,3519	0,3655	0,3792	0,3931	0,4072
	1,05	0,2761	0,2887	0,3014	0,3143	0,3274	0,3407	0,3541	0,3677	0,3815	0,3955
	1,10	0,2656	0,2782	0,2908	0,3037	0,3166	0,3298	0,3431	0,3566	0,3704	0,3843
	1,15	0,2554	0,2679	0,2805	0,2933	0,3062	0,3193	0,3325	0,3460	0,3597	0,3735
	1,20	0,2453	0,2577	0,2703	0,2831	0,2960	0,3090	0,3223	0,3357	0,3493	0,3632
	1,25	0,2351	0,2476	0,2603	0,2730	0,2860	0,2990	0,3123	0,3257	0,3393	0,3532
	1,30	0,2247	0,2374	0,2502	0,2630	0,2760	0,2892	0,3025	0,3159	0,3296	0,3434
	1,35	0,2169	0,2268	0,2399	0,2530	0,2661	0,2794	0,2928	0,3063	0,3200	0,3339
	1,40	0,2127	0,2176	0,2291	0,2426	0,2560	0,2695	0,2831	0,2968	0,3106	0,3246
	1,45	0,2086	0,2134	0,2183	0,2316	0,2456	0,2595	0,2733	0,2873	0,3012	0,3154
	1,50	0,2044	0,2092	0,2141	0,2196	0,2345	0,2490	0,2633	0,2776	0,2919	0,3062
0,3	1,00	0,3222	0,3356	0,3490	0,3627	0,3764	0,3903	0,4043	0,4185	0,4330	0,4477
	1,05	0,3112	0,3244	0,3378	0,3512	0,3648	0,3786	0,3925	0,4066	0,4209	0,4354
	1,10	0,3005	0,3136	0,3268	0,3401	0,3536	0,3672	0,3810	0,3950	0,4092	0,4236
	1,15	0,2901	0,3030	0,3161	0,3293	0,3427	0,3562	0,3699	0,3838	0,3979	0,4122
	1,20	0,2798	0,2926	0,3056	0,3188	0,3320	0,3455	0,3591	0,3729	0,3869	0,4012
	1,25	0,2696	0,2824	0,2953	0,3084	0,3216	0,3350	0,3486	0,3623	0,3763	0,3905
	1,30	0,2594	0,2721	0,2850	0,2981	0,3113	0,3247	0,3382	0,3520	0,3659	0,3801
	1,35	0,2525	0,2618	0,2748	0,2879	0,3011	0,3145	0,3281	0,3418	0,3557	0,3699
	1,40	0,2482	0,2535	0,2643	0,2775	0,2909	0,3043	0,3180	0,3318	0,3457	0,3599
	1,45	0,2439	0,2491	0,2544	0,2670	0,2805	0,2941	0,3079	0,3217	0,3358	0,3500
	1,50	0,2397	0,2449	0,2501	0,2559	0,2698	0,2837	0,2976	0,3117	0,3259	0,3402

μ_{lu} pour S 500 A ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 9

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1584	0,1687	0,1793	0,1901	0,2011	0,2124	0,2239	0,2356	0,2476	0,2599
0,05	1,00	0,1716	0,1834	0,1953	0,2074	0,2197	0,2322	0,2448	0,2577	0,2708	0,2842
	1,05	0,1692	0,1810	0,1929	0,2050	0,2173	0,2298	0,2425	0,2553	0,2684	0,2818
	1,10	0,1670	0,1788	0,1907	0,2029	0,2151	0,2276	0,2403	0,2531	0,2662	0,2795
	1,15	0,1649	0,1768	0,1887	0,2008	0,2131	0,2256	0,2383	0,2511	0,2642	0,2775
	1,20	0,1630	0,1749	0,1868	0,1990	0,2113	0,2237	0,2364	0,2493	0,2624	0,2757
	1,25	0,1612	0,1731	0,1851	0,1972	0,2095	0,2220	0,2347	0,2476	0,2606	0,2739
	1,30	0,1596	0,1715	0,1835	0,1956	0,2079	0,2204	0,2331	0,2460	0,2590	0,2723
	1,35	0,1580	0,1699	0,1820	0,1941	0,2064	0,2189	0,2316	0,2445	0,2575	0,2708
	1,40	0,1565	0,1685	0,1805	0,1927	0,2050	0,2175	0,2302	0,2431	0,2561	0,2694
	1,45	0,1551	0,1671	0,1792	0,1914	0,2037	0,2162	0,2289	0,2418	0,2548	0,2681
	1,50	0,1538	0,1658	0,1779	0,1901	0,2025	0,2150	0,2277	0,2406	0,2536	0,2669
0,1	1,00	0,1935	0,2064	0,2194	0,2326	0,2458	0,2592	0,2728	0,2866	0,3005	0,3147
	1,05	0,1879	0,2009	0,2141	0,2273	0,2406	0,2541	0,2677	0,2815	0,2955	0,3097
	1,10	0,1825	0,1958	0,2090	0,2224	0,2358	0,2493	0,2630	0,2768	0,2908	0,3050
	1,15	0,1772	0,1908	0,2042	0,2177	0,2312	0,2448	0,2585	0,2724	0,2864	0,3007
	1,20	0,1722	0,1860	0,1997	0,2133	0,2269	0,2406	0,2543	0,2683	0,2823	0,2966
	1,25	0,1671	0,1814	0,1953	0,2090	0,2228	0,2366	0,2504	0,2644	0,2785	0,2928
	1,30	0,1621	0,1768	0,1910	0,2050	0,2189	0,2328	0,2467	0,2607	0,2749	0,2892
	1,35	0,1570	0,1724	0,1869	0,2011	0,2152	0,2292	0,2432	0,2573	0,2715	0,2859
	1,40	0,1516	0,1679	0,1829	0,1974	0,2116	0,2257	0,2399	0,2540	0,2683	0,2827
	1,45	0,1459	0,1634	0,1790	0,1938	0,2082	0,2225	0,2367	0,2509	0,2653	0,2797
	1,50	0,1391	0,1588	0,1751	0,1903	0,2049	0,2193	0,2337	0,2480	0,2624	0,2769
0,15	1,00	0,2237	0,2372	0,2507	0,2644	0,2782	0,2921	0,3062	0,3206	0,3351	0,3498
	1,05	0,2154	0,2291	0,2428	0,2566	0,2705	0,2845	0,2987	0,3131	0,3276	0,3424
	1,10	0,2072	0,2212	0,2351	0,2491	0,2632	0,2773	0,2916	0,3060	0,3206	0,3355
	1,15	0,1989	0,2134	0,2277	0,2419	0,2561	0,2704	0,2848	0,2993	0,3140	0,3289
	1,20	0,1903	0,2055	0,2203	0,2348	0,2493	0,2638	0,2783	0,2930	0,3077	0,3227
	1,25	0,1810	0,1974	0,2129	0,2279	0,2427	0,2574	0,2721	0,2869	0,3018	0,3168
	1,30	0,1700	0,1888	0,2053	0,2209	0,2361	0,2512	0,2661	0,2810	0,2960	0,3112
	1,35	0,1373	0,1790	0,1974	0,2139	0,2297	0,2451	0,2603	0,2754	0,2906	0,3058
	1,40	0,1282	0,1655	0,1888	0,2067	0,2232	0,2391	0,2546	0,2700	0,2853	0,3007
	1,45		0,1262	0,1784	0,1991	0,2167	0,2331	0,2490	0,2647	0,2802	0,2958
	1,50			0,1237	0,1906	0,2099	0,2271	0,2435	0,2595	0,2753	0,2910
0,2	1,00	0,2582	0,2718	0,2856	0,2995	0,3136	0,3279	0,3423	0,3569	0,3718	0,3870
	1,05	0,2483	0,2621	0,2760	0,2900	0,3042	0,3185	0,3330	0,3477	0,3626	0,3777
	1,10	0,2385	0,2525	0,2666	0,2808	0,2951	0,3095	0,3241	0,3388	0,3538	0,3690
	1,15	0,2286	0,2430	0,2574	0,2718	0,2862	0,3008	0,3155	0,3304	0,3454	0,3607
	1,20	0,2183	0,2333	0,2481	0,2628	0,2776	0,2923	0,3072	0,3222	0,3373	0,3527
	1,25	0,2070	0,2232	0,2387	0,2539	0,2690	0,2840	0,2991	0,3143	0,3296	0,3450
	1,30	0,1935	0,2121	0,2288	0,2448	0,2604	0,2758	0,2912	0,3066	0,3220	0,3376
	1,35	0,1783	0,1987	0,2180	0,2353	0,2516	0,2676	0,2833	0,2990	0,3147	0,3305
	1,40	0,1730	0,1789	0,2051	0,2249	0,2426	0,2593	0,2755	0,2915	0,3075	0,3235
	1,45	0,1662	0,1732	0,1796	0,2128	0,2328	0,2507	0,2676	0,2841	0,3005	0,3167
	1,50		0,1653	0,1734	0,1926	0,2216	0,2415	0,2595	0,2767	0,2935	0,3100
0,25	1,00	0,2929	0,3067	0,3207	0,3349	0,3492	0,3637	0,3783	0,3932	0,4084	0,4238
	1,05	0,2823	0,2962	0,3102	0,3244	0,3387	0,3532	0,3679	0,3828	0,3980	0,4134
	1,10	0,2718	0,2858	0,2999	0,3142	0,3286	0,3432	0,3579	0,3728	0,3880	0,4035
	1,15	0,2613	0,2755	0,2898	0,3042	0,3187	0,3333	0,3482	0,3632	0,3784	0,3939
	1,20	0,2505	0,2651	0,2796	0,2942	0,3089	0,3237	0,3387	0,3538	0,3691	0,3847
	1,25	0,2392	0,2543	0,2693	0,2842	0,2992	0,3142	0,3293	0,3446	0,3601	0,3757
	1,30	0,2267	0,2429	0,2586	0,2741	0,2894	0,3048	0,3201	0,3356	0,3512	0,3670
	1,35	0,2166	0,2301	0,2472	0,2635	0,2795	0,2953	0,3110	0,3267	0,3426	0,3585
	1,40	0,2117	0,2174	0,2341	0,2521	0,2691	0,2855	0,3018	0,3179	0,3340	0,3502
	1,45	0,2065	0,2124	0,2182	0,2390	0,2579	0,2754	0,2923	0,3090	0,3255	0,3420
	1,50	0,2007	0,2069	0,2130	0,2205	0,2449	0,2645	0,2825	0,2999	0,3169	0,3338
0,3	1,00	0,3257	0,3399	0,3541	0,3685	0,3830	0,3977	0,4126	0,4277	0,4431	0,4589
	1,05	0,3149	0,3290	0,3432	0,3576	0,3721	0,3868	0,4016	0,4167	0,4321	0,4478
	1,10	0,3042	0,3183	0,3325	0,3469	0,3614	0,3761	0,3910	0,4061	0,4215	0,4372
	1,15	0,2936	0,3077	0,3220	0,3364	0,3510	0,3657	0,3806	0,3958	0,4112	0,4269
	1,20	0,2828	0,2971	0,3115	0,3260	0,3407	0,3555	0,3705	0,3857	0,4011	0,4169
	1,25	0,2718	0,2863	0,3010	0,3157	0,3305	0,3454	0,3605	0,3758	0,3913	0,4071
	1,30	0,2602	0,2752	0,2902	0,3052	0,3202	0,3354	0,3507	0,3661	0,3817	0,3976
	1,35	0,2522	0,2633	0,2789	0,2944	0,3098	0,3253	0,3408	0,3564	0,3723	0,3883
	1,40	0,2475	0,2533	0,2668	0,2831	0,2991	0,3150	0,3309	0,3468	0,3628	0,3791
	1,45	0,2426	0,2484	0,2543	0,2708	0,2878	0,3044	0,3207	0,3371	0,3534	0,3699
	1,50	0,2375	0,2435	0,2494	0,2563	0,2753	0,2931	0,3102	0,3271	0,3439	0,3607

μ_{lu} pour S 500 A ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 12

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1886	0,2003	0,2123	0,2245	0,2369	0,2496	0,2625	0,2757	0,2892	0,3029
0,05	1,00	0,1993	0,2122	0,2254	0,2387	0,2522	0,2659	0,2798	0,2939	0,3083	0,3229
	1,05	0,1973	0,2102	0,2234	0,2367	0,2502	0,2639	0,2778	0,2920	0,3063	0,3210
	1,10	0,1955	0,2084	0,2216	0,2349	0,2484	0,2621	0,2760	0,2902	0,3045	0,3191
	1,15	0,1938	0,2068	0,2199	0,2332	0,2467	0,2605	0,2744	0,2885	0,3029	0,3175
	1,20	0,1922	0,2052	0,2184	0,2317	0,2452	0,2589	0,2728	0,2870	0,3013	0,3160
	1,25	0,1908	0,2038	0,2170	0,2303	0,2438	0,2575	0,2714	0,2856	0,2999	0,3146
	1,30	0,1894	0,2025	0,2156	0,2290	0,2425	0,2562	0,2701	0,2843	0,2986	0,3132
	1,35	0,1882	0,2012	0,2144	0,2278	0,2413	0,2550	0,2689	0,2831	0,2974	0,3120
	1,40	0,1870	0,2001	0,2133	0,2266	0,2401	0,2539	0,2678	0,2819	0,2963	0,3109
	1,45	0,1859	0,1990	0,2122	0,2255	0,2391	0,2528	0,2667	0,2809	0,2952	0,3098
	1,50	0,1849	0,1979	0,2112	0,2245	0,2381	0,2518	0,2657	0,2799	0,2942	0,3089
0,1	1,00	0,2159	0,2299	0,2441	0,2584	0,2728	0,2873	0,3021	0,3170	0,3321	0,3475
	1,05	0,2112	0,2254	0,2397	0,2540	0,2685	0,2831	0,2978	0,3128	0,3279	0,3433
	1,10	0,2067	0,2211	0,2355	0,2499	0,2644	0,2791	0,2939	0,3089	0,3241	0,3395
	1,15	0,2025	0,2171	0,2316	0,2461	0,2607	0,2754	0,2903	0,3053	0,3205	0,3360
	1,20	0,1985	0,2132	0,2279	0,2425	0,2572	0,2720	0,2869	0,3019	0,3172	0,3326
	1,25	0,1946	0,2096	0,2244	0,2391	0,2539	0,2687	0,2837	0,2988	0,3141	0,3296
	1,30	0,1909	0,2061	0,2211	0,2359	0,2508	0,2657	0,2807	0,2958	0,3112	0,3267
	1,35	0,1873	0,2028	0,2179	0,2329	0,2478	0,2628	0,2779	0,2931	0,3084	0,3240
	1,40	0,1838	0,1996	0,2149	0,2300	0,2451	0,2601	0,2752	0,2905	0,3059	0,3215
	1,45	0,1804	0,1965	0,2120	0,2273	0,2424	0,2575	0,2727	0,2880	0,3035	0,3191
	1,50	0,1770	0,1935	0,2092	0,2246	0,2399	0,2551	0,2704	0,2857	0,3012	0,3168
0,15	1,00	0,2394	0,2541	0,2689	0,2837	0,2986	0,3137	0,3289	0,3443	0,3600	0,3759
	1,05	0,2320	0,2470	0,2619	0,2769	0,2920	0,3072	0,3225	0,3380	0,3537	0,3696
	1,10	0,2247	0,2400	0,2553	0,2705	0,2857	0,3010	0,3164	0,3320	0,3478	0,3638
	1,15	0,2175	0,2333	0,2488	0,2643	0,2797	0,2952	0,3107	0,3264	0,3423	0,3583
	1,20	0,2101	0,2266	0,2426	0,2583	0,2740	0,2896	0,3053	0,3211	0,3370	0,3532
	1,25	0,2026	0,2199	0,2364	0,2525	0,2684	0,2843	0,3001	0,3160	0,3321	0,3483
	1,30	0,1944	0,2131	0,2303	0,2469	0,2631	0,2792	0,2952	0,3112	0,3274	0,3437
	1,35	0,1850	0,2061	0,2242	0,2414	0,2579	0,2743	0,2905	0,3067	0,3229	0,3394
	1,40	0,1710	0,1984	0,2180	0,2359	0,2529	0,2695	0,2859	0,3023	0,3187	0,3352
	1,45		0,1896	0,2116	0,2304	0,2479	0,2649	0,2816	0,2981	0,3146	0,3313
	1,50		0,1765	0,2047	0,2248	0,2430	0,2604	0,2773	0,2941	0,3108	0,3275
0,2	1,00	0,2682	0,2830	0,2979	0,3129	0,3281	0,3433	0,3588	0,3745	0,3903	0,4065
	1,05	0,2589	0,2740	0,2891	0,3043	0,3196	0,3350	0,3506	0,3663	0,3823	0,3986
	1,10	0,2495	0,2651	0,2805	0,2960	0,3115	0,3270	0,3428	0,3586	0,3747	0,3911
	1,15	0,2400	0,2562	0,2720	0,2878	0,3036	0,3194	0,3352	0,3513	0,3675	0,3839
	1,20	0,2300	0,2471	0,2636	0,2798	0,2959	0,3119	0,3280	0,3442	0,3605	0,3771
	1,25	0,2190	0,2376	0,2550	0,2718	0,2883	0,3047	0,3210	0,3374	0,3539	0,3706
	1,30	0,2051	0,2272	0,2460	0,2637	0,2808	0,2975	0,3142	0,3308	0,3475	0,3644
	1,35	0,1778	0,2148	0,2365	0,2554	0,2732	0,2905	0,3075	0,3244	0,3414	0,3584
	1,40	0,1688	0,1785	0,2255	0,2467	0,2656	0,2835	0,3010	0,3182	0,3354	0,3526
	1,45		0,1675	0,2103	0,2370	0,2576	0,2764	0,2945	0,3121	0,3296	0,3470
	1,50			0,1657	0,2254	0,2491	0,2692	0,2880	0,3061	0,3239	0,3416
0,25	1,00	0,2990	0,3138	0,3287	0,3437	0,3588	0,3742	0,3897	0,4054	0,4214	0,4378
	1,05	0,2887	0,3037	0,3188	0,3339	0,3492	0,3647	0,3803	0,3961	0,4122	0,4287
	1,10	0,2784	0,2937	0,3090	0,3244	0,3399	0,3555	0,3712	0,3872	0,4034	0,4199
	1,15	0,2679	0,2836	0,2993	0,3150	0,3307	0,3465	0,3624	0,3785	0,3949	0,4115
	1,20	0,2569	0,2733	0,2895	0,3056	0,3216	0,3377	0,3539	0,3702	0,3866	0,4034
	1,25	0,2448	0,2625	0,2795	0,2961	0,3126	0,3290	0,3455	0,3620	0,3787	0,3956
	1,30	0,2302	0,2505	0,2689	0,2865	0,3035	0,3204	0,3372	0,3540	0,3709	0,3880
	1,35	0,2163	0,2360	0,2573	0,2763	0,2943	0,3117	0,3290	0,3461	0,3633	0,3806
	1,40	0,2102	0,2171	0,2432	0,2651	0,2845	0,3029	0,3208	0,3383	0,3559	0,3734
	1,45	0,2025	0,2107	0,2181	0,2519	0,2740	0,2937	0,3124	0,3306	0,3485	0,3664
	1,50		0,2017	0,2112	0,2293	0,2619	0,2839	0,3038	0,3227	0,3412	0,3594
0,3	1,00	0,3292	0,3440	0,3589	0,3739	0,3890	0,4043	0,4198	0,4356	0,4517	0,4683
	1,05	0,3187	0,3335	0,3485	0,3636	0,3788	0,3942	0,4098	0,4256	0,4418	0,4584
	1,10	0,3081	0,3231	0,3382	0,3535	0,3688	0,3844	0,4001	0,4160	0,4322	0,4489
	1,15	0,2973	0,3126	0,3280	0,3434	0,3590	0,3747	0,3905	0,4066	0,4229	0,4397
	1,20	0,2863	0,3020	0,3177	0,3334	0,3492	0,3651	0,3812	0,3974	0,4139	0,4307
	1,25	0,2745	0,2909	0,3072	0,3233	0,3395	0,3557	0,3720	0,3884	0,4051	0,4220
	1,30	0,2613	0,2791	0,2962	0,3130	0,3296	0,3462	0,3628	0,3795	0,3964	0,4135
	1,35	0,2520	0,2656	0,2843	0,3021	0,3195	0,3366	0,3536	0,3707	0,3878	0,4052
	1,40	0,2465	0,2531	0,2707	0,2904	0,3088	0,3267	0,3443	0,3618	0,3793	0,3969
	1,45	0,2407	0,2475	0,2543	0,2767	0,2973	0,3164	0,3348	0,3529	0,3708	0,3888
	1,50	0,2339	0,2413	0,2485	0,2573	0,2840	0,3053	0,3249	0,3438	0,3623	0,3807

μ_{lu} pour S 500 A ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 18

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2125	0,2252	0,2382	0,2513	0,2647	0,2784	0,2923	0,3065	0,3209	0,3356
0,05	1,00	0,2215	0,2352	0,2492	0,2633	0,2777	0,2922	0,3069	0,3219	0,3371	0,3527
	1,05	0,2198	0,2336	0,2475	0,2617	0,2760	0,2905	0,3053	0,3202	0,3355	0,3510
	1,10	0,2182	0,2320	0,2460	0,2601	0,2745	0,2890	0,3037	0,3187	0,3340	0,3495
	1,15	0,2168	0,2306	0,2446	0,2587	0,2731	0,2876	0,3024	0,3173	0,3326	0,3481
	1,20	0,2155	0,2293	0,2433	0,2574	0,2718	0,2863	0,3011	0,3161	0,3313	0,3468
	1,25	0,2143	0,2281	0,2421	0,2562	0,2706	0,2851	0,2999	0,3149	0,3301	0,3456
	1,30	0,2131	0,2270	0,2410	0,2551	0,2695	0,2840	0,2988	0,3138	0,3290	0,3445
	1,35	0,2121	0,2259	0,2399	0,2541	0,2685	0,2830	0,2978	0,3127	0,3280	0,3435
	1,40	0,2111	0,2250	0,2390	0,2531	0,2675	0,2820	0,2968	0,3118	0,3270	0,3425
	1,45	0,2102	0,2240	0,2381	0,2522	0,2666	0,2812	0,2959	0,3109	0,3261	0,3417
	1,50	0,2093	0,2232	0,2372	0,2514	0,2658	0,2803	0,2951	0,3101	0,3253	0,3408
0,1	1,00	0,2348	0,2496	0,2645	0,2795	0,2947	0,3099	0,3254	0,3411	0,3570	0,3732
	1,05	0,2308	0,2457	0,2607	0,2758	0,2910	0,3063	0,3218	0,3375	0,3535	0,3697
	1,10	0,2271	0,2421	0,2572	0,2723	0,2876	0,3030	0,3185	0,3342	0,3502	0,3664
	1,15	0,2236	0,2387	0,2539	0,2691	0,2844	0,2999	0,3154	0,3312	0,3472	0,3634
	1,20	0,2203	0,2356	0,2508	0,2661	0,2815	0,2970	0,3126	0,3284	0,3444	0,3607
	1,25	0,2171	0,2326	0,2479	0,2633	0,2787	0,2943	0,3099	0,3258	0,3418	0,3581
	1,30	0,2142	0,2297	0,2452	0,2607	0,2762	0,2917	0,3074	0,3233	0,3394	0,3557
	1,35	0,2113	0,2271	0,2426	0,2582	0,2737	0,2894	0,3051	0,3210	0,3371	0,3535
	1,40	0,2086	0,2245	0,2402	0,2558	0,2714	0,2871	0,3029	0,3189	0,3350	0,3514
	1,45	0,2060	0,2221	0,2379	0,2536	0,2693	0,2850	0,3009	0,3168	0,3330	0,3494
	1,50	0,2036	0,2198	0,2357	0,2515	0,2673	0,2830	0,2989	0,3149	0,3311	0,3475
0,15	1,00	0,2537	0,2692	0,2847	0,3003	0,3159	0,3317	0,3477	0,3638	0,3801	0,3968
	1,05	0,2471	0,2629	0,2787	0,2944	0,3102	0,3261	0,3421	0,3583	0,3748	0,3915
	1,10	0,2408	0,2569	0,2729	0,2888	0,3048	0,3208	0,3369	0,3532	0,3697	0,3865
	1,15	0,2346	0,2511	0,2674	0,2835	0,2996	0,3158	0,3321	0,3485	0,3650	0,3819
	1,20	0,2285	0,2455	0,2621	0,2785	0,2948	0,3111	0,3275	0,3440	0,3606	0,3775
	1,25	0,2224	0,2400	0,2569	0,2736	0,2901	0,3066	0,3231	0,3397	0,3565	0,3734
	1,30	0,2162	0,2345	0,2520	0,2689	0,2857	0,3024	0,3190	0,3357	0,3526	0,3696
	1,35	0,2097	0,2291	0,2471	0,2644	0,2814	0,2983	0,3151	0,3319	0,3489	0,3660
	1,40	0,2028	0,2236	0,2423	0,2601	0,2774	0,2944	0,3113	0,3283	0,3453	0,3625
	1,45	0,1949	0,2181	0,2376	0,2558	0,2734	0,2907	0,3078	0,3249	0,3420	0,3593
	1,50	0,1842	0,2122	0,2329	0,2517	0,2696	0,2871	0,3044	0,3216	0,3388	0,3562
0,2	1,00	0,2778	0,2934	0,3091	0,3249	0,3407	0,3567	0,3728	0,3892	0,4057	0,4227
	1,05	0,2691	0,2852	0,3012	0,3172	0,3332	0,3493	0,3656	0,3821	0,3988	0,4158
	1,10	0,2605	0,2771	0,2934	0,3097	0,3260	0,3423	0,3587	0,3753	0,3921	0,4093
	1,15	0,2518	0,2690	0,2858	0,3024	0,3190	0,3356	0,3522	0,3689	0,3859	0,4031
	1,20	0,2427	0,2608	0,2783	0,2953	0,3122	0,3291	0,3459	0,3628	0,3799	0,3973
	1,25	0,2329	0,2525	0,2707	0,2884	0,3057	0,3228	0,3399	0,3570	0,3742	0,3917
	1,30	0,2213	0,2436	0,2631	0,2814	0,2992	0,3167	0,3340	0,3514	0,3688	0,3864
	1,35	0,2018	0,2337	0,2551	0,2744	0,2928	0,3107	0,3284	0,3460	0,3636	0,3813
	1,40		0,2211	0,2466	0,2673	0,2865	0,3049	0,3229	0,3408	0,3586	0,3765
	1,45			0,2369	0,2599	0,2801	0,2991	0,3176	0,3357	0,3538	0,3718
	1,50			0,2241	0,2520	0,2736	0,2934	0,3123	0,3308	0,3491	0,3674
0,25	1,00	0,3049	0,3204	0,3360	0,3517	0,3675	0,3834	0,3995	0,4158	0,4325	0,4496
	1,05	0,2951	0,3109	0,3268	0,3427	0,3587	0,3748	0,3911	0,4075	0,4243	0,4415
	1,10	0,2852	0,3015	0,3177	0,3339	0,3501	0,3665	0,3829	0,3996	0,4165	0,4338
	1,15	0,2750	0,2919	0,3086	0,3252	0,3418	0,3584	0,3751	0,3919	0,4090	0,4264
	1,20	0,2641	0,2821	0,2995	0,3166	0,3335	0,3505	0,3674	0,3845	0,4017	0,4193
	1,25	0,2520	0,2717	0,2901	0,3079	0,3254	0,3427	0,3600	0,3773	0,3947	0,4125
	1,30	0,2362	0,2601	0,2802	0,2991	0,3172	0,3350	0,3526	0,3703	0,3880	0,4059
	1,35	0,2158	0,2456	0,2694	0,2898	0,3089	0,3273	0,3454	0,3634	0,3814	0,3995
	1,40	0,2073	0,2168	0,2564	0,2799	0,3003	0,3196	0,3383	0,3567	0,3750	0,3934
	1,45			0,2318	0,2684	0,2913	0,3117	0,3311	0,3500	0,3687	0,3874
	1,50			0,2065	0,2530	0,2813	0,3035	0,3239	0,3434	0,3625	0,3815
0,3	1,00	0,3326	0,3479	0,3633	0,3788	0,3944	0,4102	0,4262	0,4424	0,4591	0,4764
	1,05	0,3224	0,3379	0,3535	0,3692	0,3850	0,4009	0,4170	0,4334	0,4502	0,4675
	1,10	0,3120	0,3278	0,3437	0,3596	0,3757	0,3918	0,4081	0,4247	0,4416	0,4589
	1,15	0,3013	0,3177	0,3339	0,3502	0,3665	0,3829	0,3994	0,4162	0,4332	0,4507
	1,20	0,2901	0,3072	0,3240	0,3407	0,3574	0,3741	0,3909	0,4079	0,4251	0,4427
	1,25	0,2778	0,2961	0,3138	0,3311	0,3482	0,3653	0,3825	0,3997	0,4172	0,4349
	1,30	0,2630	0,2839	0,3029	0,3212	0,3390	0,3566	0,3741	0,3917	0,4094	0,4274
	1,35	0,2516	0,2690	0,2910	0,3107	0,3295	0,3477	0,3658	0,3837	0,4018	0,4200
	1,40	0,2453	0,2528	0,2764	0,2992	0,3194	0,3386	0,3573	0,3758	0,3942	0,4128
	1,45	0,2375	0,2462	0,2541	0,2854	0,3085	0,3292	0,3488	0,3679	0,3867	0,4056
	1,50	0,2184	0,2373	0,2470	0,2618	0,2958	0,3190	0,3399	0,3598	0,3793	0,3986

μ_{lu} pour S 500 A ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 18

		M									
u	N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2319	0,2453	0,2589	0,2728	0,2869	0,3012	0,3158	0,3307	0,3458	0,3612
0,05	1,00	0,2396	0,2540	0,2685	0,2832	0,2981	0,3132	0,3285	0,3441	0,3599	0,3760
	1,05	0,2381	0,2525	0,2670	0,2817	0,2966	0,3117	0,3271	0,3426	0,3584	0,3746
	1,10	0,2368	0,2512	0,2657	0,2804	0,2953	0,3104	0,3258	0,3413	0,3571	0,3733
	1,15	0,2355	0,2499	0,2645	0,2792	0,2941	0,3092	0,3246	0,3401	0,3559	0,3721
	1,20	0,2344	0,2488	0,2634	0,2781	0,2930	0,3081	0,3234	0,3390	0,3548	0,3710
	1,25	0,2333	0,2478	0,2623	0,2771	0,2920	0,3071	0,3224	0,3380	0,3538	0,3700
	1,30	0,2324	0,2468	0,2614	0,2761	0,2910	0,3061	0,3215	0,3370	0,3529	0,3690
	1,35	0,2315	0,2459	0,2605	0,2752	0,2901	0,3053	0,3206	0,3362	0,3520	0,3681
	1,40	0,2306	0,2450	0,2596	0,2744	0,2893	0,3044	0,3198	0,3354	0,3512	0,3673
	1,45	0,2298	0,2443	0,2588	0,2736	0,2885	0,3037	0,3190	0,3346	0,3504	0,3666
	1,50	0,2291	0,2435	0,2581	0,2729	0,2878	0,3030	0,3183	0,3339	0,3497	0,3659
0,1	1,00	0,2507	0,2660	0,2814	0,2969	0,3125	0,3283	0,3442	0,3604	0,3768	0,3936
	1,05	0,2472	0,2626	0,2781	0,2937	0,3093	0,3252	0,3412	0,3574	0,3738	0,3906
	1,10	0,2440	0,2595	0,2751	0,2907	0,3064	0,3223	0,3383	0,3545	0,3710	0,3878
	1,15	0,2410	0,2566	0,2722	0,2879	0,3037	0,3196	0,3357	0,3519	0,3684	0,3852
	1,20	0,2382	0,2539	0,2696	0,2853	0,3012	0,3171	0,3332	0,3495	0,3660	0,3829
	1,25	0,2356	0,2514	0,2671	0,2829	0,2988	0,3148	0,3309	0,3473	0,3638	0,3807
	1,30	0,2331	0,2490	0,2648	0,2807	0,2966	0,3126	0,3288	0,3452	0,3618	0,3786
	1,35	0,2308	0,2467	0,2627	0,2786	0,2946	0,3106	0,3268	0,3432	0,3598	0,3767
	1,40	0,2285	0,2446	0,2606	0,2766	0,2926	0,3087	0,3250	0,3414	0,3580	0,3749
	1,45	0,2264	0,2426	0,2587	0,2747	0,2908	0,3070	0,3232	0,3397	0,3563	0,3732
	1,50	0,2244	0,2407	0,2569	0,2730	0,2891	0,3053	0,3216	0,3381	0,3547	0,3717
0,15	1,00	0,2663	0,2823	0,2983	0,3144	0,3305	0,3467	0,3631	0,3797	0,3966	0,4137
	1,05	0,2605	0,2768	0,2930	0,3092	0,3255	0,3418	0,3583	0,3750	0,3919	0,4091
	1,10	0,2550	0,2715	0,2880	0,3043	0,3207	0,3372	0,3538	0,3706	0,3876	0,4049
	1,15	0,2497	0,2665	0,2832	0,2998	0,3163	0,3329	0,3496	0,3665	0,3835	0,4009
	1,20	0,2445	0,2617	0,2786	0,2954	0,3121	0,3288	0,3457	0,3626	0,3797	0,3971
	1,25	0,2394	0,2571	0,2743	0,2913	0,3082	0,3250	0,3419	0,3590	0,3762	0,3936
	1,30	0,2344	0,2526	0,2701	0,2873	0,3044	0,3214	0,3384	0,3555	0,3728	0,3904
	1,35	0,2295	0,2482	0,2661	0,2836	0,3008	0,3179	0,3351	0,3523	0,3697	0,3873
	1,40	0,2245	0,2439	0,2622	0,2799	0,2974	0,3147	0,3319	0,3493	0,3667	0,3844
	1,45	0,2194	0,2397	0,2584	0,2765	0,2941	0,3116	0,3289	0,3464	0,3639	0,3816
	1,50	0,2141	0,2355	0,2548	0,2731	0,2910	0,3086	0,3261	0,3436	0,3612	0,3790
0,2	1,00	0,2866	0,3029	0,3191	0,3354	0,3517	0,3681	0,3847	0,4015	0,4185	0,4360
	1,05	0,2788	0,2954	0,3119	0,3284	0,3450	0,3616	0,3783	0,3952	0,4124	0,4299
	1,10	0,2709	0,2881	0,3050	0,3218	0,3386	0,3554	0,3723	0,3893	0,4066	0,4243
	1,15	0,2631	0,2809	0,2982	0,3154	0,3324	0,3494	0,3665	0,3837	0,4012	0,4189
	1,20	0,2551	0,2737	0,2916	0,3091	0,3265	0,3437	0,3610	0,3784	0,3960	0,4138
	1,25	0,2466	0,2664	0,2850	0,3030	0,3207	0,3383	0,3558	0,3734	0,3911	0,4090
	1,30	0,2373	0,2589	0,2785	0,2971	0,3152	0,3330	0,3508	0,3685	0,3864	0,4045
	1,35	0,2259	0,2510	0,2719	0,2912	0,3098	0,3279	0,3459	0,3639	0,3819	0,4002
	1,40		0,2423	0,2651	0,2853	0,3044	0,3230	0,3413	0,3595	0,3777	0,3960
	1,45		0,2316	0,2579	0,2794	0,2992	0,3182	0,3368	0,3552	0,3736	0,3921
	1,50			0,2501	0,2734	0,2940	0,3135	0,3324	0,3511	0,3697	0,3883
0,25	1,00	0,3105	0,3266	0,3427	0,3589	0,3751	0,3915	0,4080	0,4247	0,4418	0,4595
	1,05	0,3012	0,3177	0,3342	0,3506	0,3671	0,3837	0,4004	0,4173	0,4345	0,4523
	1,10	0,2919	0,3089	0,3258	0,3425	0,3593	0,3761	0,3931	0,4102	0,4276	0,4454
	1,15	0,2822	0,3000	0,3174	0,3346	0,3517	0,3689	0,3860	0,4034	0,4209	0,4389
	1,20	0,2719	0,2908	0,3090	0,3268	0,3443	0,3618	0,3792	0,3968	0,4145	0,4326
	1,25	0,2603	0,2812	0,3005	0,3189	0,3370	0,3548	0,3726	0,3904	0,4084	0,4267
	1,30	0,2454	0,2706	0,2916	0,3110	0,3297	0,3480	0,3662	0,3843	0,4025	0,4209
	1,35	0,2150	0,2578	0,2820	0,3029	0,3224	0,3413	0,3599	0,3783	0,3968	0,4154
	1,40	0,1953	0,2162	0,2711	0,2943	0,3150	0,3346	0,3537	0,3725	0,3912	0,4101
	1,45			0,2564	0,2849	0,3073	0,3279	0,3475	0,3668	0,3858	0,4049
	1,50				0,2739	0,2992	0,3210	0,3414	0,3611	0,3806	0,3999
0,3	1,00	0,3359	0,3516	0,3674	0,3833	0,3993	0,4154	0,4318	0,4484	0,4654	0,4814
	1,05	0,3260	0,3421	0,3581	0,3743	0,3905	0,4069	0,4234	0,4402	0,4573	0,4753
	1,10	0,3159	0,3324	0,3489	0,3654	0,3819	0,3985	0,4153	0,4322	0,4496	0,4676
	1,15	0,3055	0,3227	0,3396	0,3565	0,3734	0,3903	0,4073	0,4245	0,4421	0,4601
	1,20	0,2944	0,3125	0,3302	0,3477	0,3650	0,3822	0,3996	0,4170	0,4348	0,4530
	1,25	0,2818	0,3017	0,3205	0,3387	0,3565	0,3742	0,3919	0,4097	0,4277	0,4461
	1,30	0,2656	0,2895	0,3101	0,3294	0,3480	0,3662	0,3844	0,4025	0,4208	0,4394
	1,35	0,2512	0,2740	0,2986	0,3196	0,3392	0,3582	0,3769	0,3954	0,4140	0,4328
	1,40	0,2434	0,2525	0,2843	0,3088	0,3301	0,3500	0,3693	0,3884	0,4073	0,4265
	1,45	0,2263	0,2439	0,2540	0,2961	0,3202	0,3415	0,3617	0,3813	0,4008	0,4202
	1,50			0,2443	0,2763	0,3090	0,3326	0,3539	0,3743	0,3942	0,4141

μ_{lu} pour S 500 A ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 21

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2479	0,2618	0,2760	0,2903	0,3049	0,3197	0,3348	0,3501	0,3658	0,3817
0,05	1,00	0,2546	0,2694	0,2843	0,2995	0,3148	0,3303	0,3460	0,3619	0,3782	0,3948
	1,05	0,2533	0,2681	0,2831	0,2982	0,3135	0,3290	0,3447	0,3607	0,3769	0,3935
	1,10	0,2521	0,2669	0,2819	0,2970	0,3123	0,3278	0,3436	0,3595	0,3758	0,3924
	1,15	0,2510	0,2658	0,2808	0,2959	0,3113	0,3268	0,3425	0,3585	0,3747	0,3913
	1,20	0,2500	0,2649	0,2798	0,2950	0,3103	0,3258	0,3415	0,3575	0,3738	0,3904
	1,25	0,2491	0,2639	0,2789	0,2941	0,3094	0,3249	0,3406	0,3566	0,3729	0,3895
	1,30	0,2483	0,2631	0,2781	0,2932	0,3085	0,3241	0,3398	0,3558	0,3721	0,3887
	1,35	0,2475	0,2623	0,2773	0,2924	0,3078	0,3233	0,3390	0,3550	0,3713	0,3879
	1,40	0,2467	0,2615	0,2765	0,2917	0,3070	0,3226	0,3383	0,3543	0,3706	0,3872
	1,45	0,2460	0,2609	0,2759	0,2910	0,3064	0,3219	0,3377	0,3537	0,3699	0,3865
	1,50	0,2454	0,2602	0,2752	0,2904	0,3057	0,3213	0,3370	0,3530	0,3693	0,3859
0,1	1,00	0,2641	0,2797	0,2955	0,3113	0,3273	0,3434	0,3597	0,3762	0,3929	0,4101
	1,05	0,2611	0,2768	0,2926	0,3085	0,3245	0,3406	0,3569	0,3735	0,3903	0,4074
	1,10	0,2583	0,2741	0,2899	0,3059	0,3219	0,3381	0,3545	0,3710	0,3879	0,4050
	1,15	0,2556	0,2715	0,2874	0,3034	0,3195	0,3358	0,3522	0,3688	0,3856	0,4028
	1,20	0,2532	0,2692	0,2851	0,3012	0,3173	0,3336	0,3500	0,3667	0,3835	0,4007
	1,25	0,2509	0,2670	0,2830	0,2991	0,3153	0,3316	0,3480	0,3647	0,3816	0,3988
	1,30	0,2488	0,2649	0,2810	0,2971	0,3134	0,3297	0,3462	0,3629	0,3798	0,3971
	1,35	0,2468	0,2630	0,2791	0,2953	0,3116	0,3280	0,3445	0,3612	0,3781	0,3954
	1,40	0,2449	0,2612	0,2774	0,2936	0,3099	0,3263	0,3429	0,3596	0,3766	0,3939
	1,45	0,2431	0,2594	0,2757	0,2920	0,3083	0,3248	0,3414	0,3581	0,3751	0,3924
	1,50	0,2414	0,2578	0,2741	0,2905	0,3069	0,3233	0,3399	0,3567	0,3737	0,3910
0,15	1,00	0,2773	0,2936	0,3100	0,3263	0,3428	0,3593	0,3760	0,3929	0,4101	0,4276
	1,05	0,2722	0,2887	0,3052	0,3218	0,3383	0,3550	0,3718	0,3887	0,4060	0,4236
	1,10	0,2673	0,2841	0,3008	0,3175	0,3342	0,3509	0,3678	0,3849	0,4022	0,4198
	1,15	0,2627	0,2797	0,2966	0,3135	0,3303	0,3471	0,3641	0,3813	0,3987	0,4164
	1,20	0,2582	0,2756	0,2927	0,3097	0,3266	0,3436	0,3607	0,3779	0,3954	0,4131
	1,25	0,2539	0,2716	0,2889	0,3061	0,3232	0,3403	0,3574	0,3747	0,3923	0,4101
	1,30	0,2497	0,2677	0,2853	0,3027	0,3199	0,3371	0,3544	0,3718	0,3894	0,4072
	1,35	0,2457	0,2641	0,2819	0,2994	0,3168	0,3342	0,3515	0,3690	0,3866	0,4046
	1,40	0,2417	0,2605	0,2786	0,2964	0,3139	0,3313	0,3488	0,3664	0,3841	0,4021
	1,45	0,2377	0,2571	0,2755	0,2934	0,3111	0,3287	0,3462	0,3639	0,3816	0,3997
	1,50	0,2338	0,2537	0,2724	0,2906	0,3084	0,3261	0,3438	0,3615	0,3794	0,3974
0,2	1,00	0,2947	0,3114	0,3280	0,3445	0,3612	0,3779	0,3948	0,4119	0,4292	0,4471
	1,05	0,2875	0,3046	0,3215	0,3383	0,3551	0,3721	0,3891	0,4063	0,4238	0,4417
	1,10	0,2805	0,2980	0,3152	0,3323	0,3494	0,3665	0,3837	0,4011	0,4187	0,4367
	1,15	0,2735	0,2915	0,3092	0,3266	0,3439	0,3613	0,3786	0,3961	0,4139	0,4320
	1,20	0,2664	0,2852	0,3033	0,3211	0,3387	0,3563	0,3738	0,3915	0,4093	0,4276
	1,25	0,2592	0,2789	0,2976	0,3158	0,3337	0,3515	0,3692	0,3870	0,4051	0,4234
	1,30	0,2515	0,2725	0,2919	0,3106	0,3288	0,3469	0,3648	0,3828	0,4010	0,4194
	1,35	0,2431	0,2660	0,2863	0,3055	0,3242	0,3425	0,3607	0,3788	0,3971	0,4156
	1,40	0,2330	0,2593	0,2807	0,3006	0,3196	0,3382	0,3566	0,3750	0,3934	0,4121
	1,45		0,2520	0,2751	0,2957	0,3152	0,3341	0,3528	0,3713	0,3899	0,4087
	1,50		0,2436	0,2692	0,2908	0,3109	0,3302	0,3491	0,3678	0,3865	0,4054
0,25	1,00	0,3158	0,3323	0,3488	0,3653	0,3818	0,3985	0,4153	0,4324	0,4498	0,4679
	1,05	0,3071	0,3241	0,3409	0,3577	0,3745	0,3914	0,4084	0,4257	0,4432	0,4614
	1,10	0,2983	0,3159	0,3332	0,3503	0,3675	0,3846	0,4019	0,4193	0,4370	0,4553
	1,15	0,2893	0,3076	0,3255	0,3431	0,3606	0,3780	0,3955	0,4132	0,4311	0,4494
	1,20	0,2797	0,2992	0,3179	0,3360	0,3539	0,3717	0,3895	0,4073	0,4254	0,4439
	1,25	0,2691	0,2905	0,3101	0,3290	0,3474	0,3655	0,3836	0,4017	0,4200	0,4386
	1,30	0,2561	0,2811	0,3022	0,3219	0,3409	0,3595	0,3779	0,3963	0,4148	0,4336
	1,35	0,2138	0,2702	0,2939	0,3148	0,3345	0,3536	0,3723	0,3910	0,4098	0,4287
	1,40		0,2554	0,2848	0,3074	0,3280	0,3477	0,3669	0,3859	0,4049	0,4241
	1,45			0,2741	0,2997	0,3215	0,3419	0,3616	0,3810	0,4002	0,4196
	1,50			0,2583	0,2912	0,3148	0,3361	0,3564	0,3761	0,3957	0,4153
0,3	1,00	0,3390	0,3551	0,3712	0,3874	0,4037	0,4201	0,4366	0,4535	0,4708	0,4839
	1,05	0,3295	0,3460	0,3625	0,3790	0,3955	0,4121	0,4290	0,4460	0,4635	0,4808
	1,10	0,3198	0,3369	0,3538	0,3707	0,3875	0,4045	0,4215	0,4388	0,4565	0,4750
	1,15	0,3097	0,3276	0,3451	0,3624	0,3797	0,3969	0,4143	0,4318	0,4497	0,4682
	1,20	0,2988	0,3179	0,3362	0,3542	0,3719	0,3895	0,4072	0,4250	0,4431	0,4618
	1,25	0,2864	0,3075	0,3271	0,3458	0,3641	0,3822	0,4003	0,4184	0,4368	0,4556
	1,30	0,2695	0,2958	0,3173	0,3372	0,3563	0,3750	0,3935	0,4120	0,4306	0,4496
	1,35	0,2506	0,2808	0,3066	0,3282	0,3484	0,3677	0,3867	0,4056	0,4246	0,4438
	1,40	0,2396	0,2521	0,2936	0,3185	0,3401	0,3604	0,3800	0,3994	0,4187	0,4382
	1,45		0,2382	0,2538	0,3073	0,3314	0,3529	0,3733	0,3932	0,4129	0,4327
	1,50			0,2359	0,2924	0,3218	0,3451	0,3665	0,3870	0,4072	0,4273

μ_{lu} pour S 500 A ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 24

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2613	0,2756	0,2901	0,3049	0,3198	0,3350	0,3504	0,3661	0,3821	0,3985
0,05	1,00	0,2672	0,2823	0,2976	0,3130	0,3286	0,3444	0,3604	0,3766	0,3932	0,4101
	1,05	0,2661	0,2812	0,2964	0,3118	0,3274	0,3432	0,3592	0,3755	0,3921	0,4090
	1,10	0,2650	0,2801	0,2954	0,3108	0,3264	0,3422	0,3582	0,3745	0,3910	0,4080
	1,15	0,2640	0,2792	0,2944	0,3099	0,3255	0,3413	0,3573	0,3736	0,3901	0,4070
	1,20	0,2632	0,2783	0,2935	0,3090	0,3246	0,3404	0,3564	0,3727	0,3893	0,4062
	1,25	0,2623	0,2775	0,2927	0,3082	0,3238	0,3396	0,3556	0,3719	0,3885	0,4054
	1,30	0,2616	0,2767	0,2920	0,3074	0,3231	0,3389	0,3549	0,3712	0,3878	0,4047
	1,35	0,2608	0,2760	0,2913	0,3067	0,3224	0,3382	0,3542	0,3705	0,3871	0,4040
	1,40	0,2602	0,2753	0,2906	0,3061	0,3217	0,3375	0,3536	0,3699	0,3865	0,4034
	1,45	0,2596	0,2747	0,2900	0,3055	0,3211	0,3370	0,3530	0,3693	0,3859	0,4028
	1,50	0,2590	0,2741	0,2895	0,3049	0,3206	0,3364	0,3524	0,3687	0,3853	0,4023
0,1	1,00	0,2755	0,2914	0,3073	0,3234	0,3396	0,3559	0,3724	0,3892	0,4062	0,4236
	1,05	0,2728	0,2888	0,3048	0,3209	0,3371	0,3535	0,3700	0,3868	0,4039	0,4213
	1,10	0,2703	0,2863	0,3024	0,3186	0,3348	0,3512	0,3678	0,3846	0,4017	0,4192
	1,15	0,2680	0,2841	0,3002	0,3164	0,3327	0,3492	0,3658	0,3826	0,3998	0,4172
	1,20	0,2659	0,2820	0,2982	0,3144	0,3308	0,3473	0,3639	0,3808	0,3979	0,4154
	1,25	0,2639	0,2801	0,2963	0,3126	0,3290	0,3455	0,3622	0,3791	0,3962	0,4137
	1,30	0,2620	0,2782	0,2945	0,3109	0,3273	0,3438	0,3605	0,3775	0,3946	0,4122
	1,35	0,2602	0,2765	0,2929	0,3093	0,3257	0,3423	0,3590	0,3760	0,3932	0,4107
	1,40	0,2586	0,2750	0,2913	0,3077	0,3242	0,3408	0,3576	0,3746	0,3918	0,4094
	1,45	0,2570	0,2735	0,2899	0,3063	0,3229	0,3395	0,3563	0,3733	0,3905	0,4081
	1,50	0,2555	0,2720	0,2885	0,3050	0,3216	0,3382	0,3550	0,3720	0,3893	0,4069
0,15	1,00	0,2869	0,3034	0,3200	0,3365	0,3532	0,3699	0,3868	0,4039	0,4213	0,4392
	1,05	0,2823	0,2990	0,3158	0,3325	0,3492	0,3661	0,3830	0,4002	0,4177	0,4356
	1,10	0,2780	0,2949	0,3118	0,3286	0,3455	0,3625	0,3795	0,3968	0,4143	0,4323
	1,15	0,2739	0,2911	0,3081	0,3251	0,3421	0,3591	0,3763	0,3936	0,4112	0,4292
	1,20	0,2700	0,2874	0,3046	0,3217	0,3388	0,3560	0,3732	0,3906	0,4083	0,4263
	1,25	0,2662	0,2839	0,3013	0,3186	0,3358	0,3530	0,3704	0,3879	0,4056	0,4236
	1,30	0,2627	0,2806	0,2982	0,3156	0,3329	0,3503	0,3677	0,3852	0,4030	0,4211
	1,35	0,2592	0,2774	0,2952	0,3128	0,3302	0,3477	0,3652	0,3828	0,4006	0,4188
	1,40	0,2559	0,2744	0,2924	0,3101	0,3277	0,3452	0,3628	0,3805	0,3984	0,4166
	1,45	0,2526	0,2715	0,2897	0,3075	0,3252	0,3429	0,3605	0,3783	0,3963	0,4145
	1,50	0,2495	0,2686	0,2871	0,3051	0,3229	0,3407	0,3584	0,3763	0,3943	0,4126
0,2	1,00	0,3020	0,3189	0,3357	0,3525	0,3694	0,3863	0,4034	0,4207	0,4383	0,4564
	1,05	0,2954	0,3127	0,3298	0,3469	0,3639	0,3810	0,3983	0,4157	0,4334	0,4516
	1,10	0,2891	0,3068	0,3242	0,3415	0,3588	0,3761	0,3935	0,4110	0,4289	0,4472
	1,15	0,2828	0,3010	0,3188	0,3364	0,3539	0,3714	0,3889	0,4066	0,4246	0,4430
	1,20	0,2766	0,2954	0,3136	0,3315	0,3492	0,3669	0,3846	0,4025	0,4206	0,4390
	1,25	0,2703	0,2898	0,3085	0,3268	0,3448	0,3627	0,3806	0,3986	0,4168	0,4353
	1,30	0,2639	0,2843	0,3036	0,3222	0,3405	0,3586	0,3767	0,3948	0,4132	0,4318
	1,35	0,2572	0,2789	0,2988	0,3178	0,3364	0,3548	0,3730	0,3913	0,4098	0,4285
	1,40	0,2499	0,2733	0,2940	0,3136	0,3325	0,3511	0,3695	0,3880	0,4065	0,4254
	1,45	0,2416	0,2676	0,2893	0,3094	0,3287	0,3475	0,3662	0,3848	0,4035	0,4224
	1,50	0,2302	0,2617	0,2846	0,3053	0,3250	0,3441	0,3630	0,3817	0,4005	0,4196
0,25	1,00	0,3207	0,3375	0,3543	0,3710	0,3878	0,4046	0,4217	0,4389	0,4566	0,4750
	1,05	0,3126	0,3299	0,3470	0,3640	0,3811	0,3982	0,4154	0,4329	0,4507	0,4692
	1,10	0,3044	0,3223	0,3399	0,3573	0,3746	0,3920	0,4095	0,4271	0,4451	0,4636
	1,15	0,2960	0,3147	0,3329	0,3507	0,3684	0,3861	0,4038	0,4216	0,4397	0,4584
	1,20	0,2873	0,3071	0,3259	0,3443	0,3624	0,3803	0,3983	0,4164	0,4347	0,4535
	1,25	0,2778	0,2992	0,3190	0,3379	0,3565	0,3748	0,3930	0,4113	0,4298	0,4487
	1,30	0,2666	0,2909	0,3119	0,3317	0,3507	0,3694	0,3880	0,4065	0,4252	0,4443
	1,35	0,2498	0,2817	0,3047	0,3254	0,3450	0,3642	0,3831	0,4019	0,4208	0,4400
	1,40		0,2708	0,2970	0,3190	0,3394	0,3590	0,3783	0,3974	0,4165	0,4359
	1,45		0,2518	0,2886	0,3125	0,3338	0,3540	0,3736	0,3930	0,4124	0,4319
	1,50			0,2787	0,3056	0,3282	0,3490	0,3691	0,3888	0,4084	0,4282
0,3	1,00	0,3419	0,3583	0,3747	0,3911	0,4076	0,4241	0,4409	0,4579	0,4756	0,4860
	1,05	0,3328	0,3497	0,3665	0,3832	0,4000	0,4168	0,4338	0,4511	0,4689	0,4832
	1,10	0,3236	0,3410	0,3583	0,3755	0,3926	0,4098	0,4270	0,4445	0,4625	0,4806
	1,15	0,3139	0,3322	0,3501	0,3678	0,3853	0,4028	0,4204	0,4382	0,4563	0,4753
	1,20	0,3034	0,3231	0,3419	0,3602	0,3782	0,3961	0,4140	0,4320	0,4504	0,4694
	1,25	0,2914	0,3133	0,3333	0,3524	0,3711	0,3894	0,4077	0,4260	0,4446	0,4638
	1,30	0,2749	0,3024	0,3244	0,3446	0,3639	0,3828	0,4015	0,4202	0,4391	0,4584
	1,35	0,2498	0,2886	0,3146	0,3364	0,3567	0,3763	0,3955	0,4145	0,4337	0,4532
	1,40		0,2514	0,3031	0,3277	0,3494	0,3697	0,3895	0,4090	0,4284	0,4482
	1,45			0,2863	0,3181	0,3417	0,3631	0,3835	0,4035	0,4233	0,4433
	1,50				0,3064	0,3335	0,3563	0,3776	0,3981	0,4183	0,4386

μ_{lu} pour S 500 A ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 27

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2726	0,2873	0,3021	0,3171	0,3323	0,3477	0,3634	0,3794	0,3957	0,4123
0,05	1,00	0,2780	0,2933	0,3088	0,3244	0,3402	0,3562	0,3724	0,3889	0,4056	0,4228
	1,05	0,2769	0,2923	0,3077	0,3234	0,3392	0,3552	0,3714	0,3879	0,4046	0,4218
	1,10	0,2760	0,2913	0,3068	0,3224	0,3383	0,3543	0,3705	0,3870	0,4037	0,4209
	1,15	0,2751	0,2904	0,3059	0,3216	0,3374	0,3534	0,3696	0,3861	0,4029	0,4201
	1,20	0,2743	0,2896	0,3051	0,3208	0,3366	0,3526	0,3689	0,3854	0,4021	0,4193
	1,25	0,2736	0,2889	0,3044	0,3201	0,3359	0,3519	0,3682	0,3846	0,4014	0,4186
	1,30	0,2729	0,2882	0,3037	0,3194	0,3352	0,3513	0,3675	0,3840	0,4008	0,4180
	1,35	0,2722	0,2876	0,3031	0,3188	0,3346	0,3506	0,3669	0,3834	0,4002	0,4174
	1,40	0,2716	0,2870	0,3025	0,3182	0,3340	0,3501	0,3663	0,3828	0,3996	0,4168
	1,45	0,2711	0,2864	0,3020	0,3176	0,3335	0,3495	0,3658	0,3823	0,3991	0,4163
	1,50	0,2705	0,2859	0,3015	0,3171	0,3330	0,3490	0,3653	0,3818	0,3986	0,4158
0,1	1,00	0,2853	0,3013	0,3175	0,3337	0,3500	0,3665	0,3832	0,4001	0,4173	0,4350
	1,05	0,2829	0,2990	0,3151	0,3314	0,3478	0,3643	0,3810	0,3980	0,4152	0,4329
	1,10	0,2806	0,2968	0,3130	0,3293	0,3458	0,3623	0,3791	0,3960	0,4133	0,4310
	1,15	0,2786	0,2948	0,3111	0,3274	0,3439	0,3605	0,3772	0,3942	0,4115	0,4292
	1,20	0,2766	0,2929	0,3092	0,3256	0,3421	0,3588	0,3756	0,3926	0,4099	0,4276
	1,25	0,2749	0,2912	0,3076	0,3240	0,3405	0,3572	0,3740	0,3911	0,4084	0,4261
	1,30	0,2732	0,2896	0,3060	0,3224	0,3390	0,3557	0,3726	0,3896	0,4070	0,4247
	1,35	0,2716	0,2881	0,3045	0,3210	0,3376	0,3543	0,3712	0,3883	0,4057	0,4234
	1,40	0,2702	0,2866	0,3031	0,3197	0,3363	0,3530	0,3699	0,3871	0,4044	0,4222
	1,45	0,2688	0,2853	0,3018	0,3184	0,3351	0,3518	0,3688	0,3859	0,4033	0,4211
	1,50	0,2675	0,2841	0,3006	0,3172	0,3339	0,3507	0,3676	0,3848	0,4022	0,4200
0,15	1,00	0,2952	0,3119	0,3286	0,3453	0,3621	0,3790	0,3960	0,4132	0,4308	0,4489
	1,05	0,2911	0,3080	0,3248	0,3416	0,3585	0,3755	0,3926	0,4099	0,4275	0,4457
	1,10	0,2872	0,3043	0,3213	0,3382	0,3552	0,3723	0,3895	0,4068	0,4245	0,4427
	1,15	0,2836	0,3008	0,3179	0,3350	0,3521	0,3693	0,3865	0,4040	0,4217	0,4399
	1,20	0,2801	0,2976	0,3148	0,3320	0,3492	0,3665	0,3838	0,4013	0,4192	0,4374
	1,25	0,2768	0,2945	0,3119	0,3292	0,3465	0,3638	0,3813	0,3989	0,4167	0,4350
	1,30	0,2737	0,2915	0,3091	0,3266	0,3440	0,3614	0,3789	0,3965	0,4145	0,4328
	1,35	0,2707	0,2887	0,3065	0,3241	0,3416	0,3591	0,3766	0,3944	0,4123	0,4307
	1,40	0,2678	0,2861	0,3040	0,3217	0,3393	0,3569	0,3745	0,3923	0,4103	0,4287
	1,45	0,2650	0,2836	0,3016	0,3195	0,3372	0,3548	0,3725	0,3904	0,4085	0,4269
	1,50	0,2624	0,2811	0,2994	0,3173	0,3351	0,3529	0,3707	0,3886	0,4067	0,4252
0,2	1,00	0,3085	0,3256	0,3426	0,3595	0,3765	0,3936	0,4107	0,4282	0,4459	0,4644
	1,05	0,3025	0,3200	0,3372	0,3544	0,3716	0,3888	0,4061	0,4237	0,4416	0,4600
	1,10	0,2968	0,3146	0,3321	0,3495	0,3669	0,3843	0,4018	0,4195	0,4375	0,4560
	1,15	0,2911	0,3094	0,3272	0,3449	0,3625	0,3801	0,3977	0,4155	0,4336	0,4522
	1,20	0,2856	0,3043	0,3226	0,3405	0,3583	0,3761	0,3939	0,4118	0,4300	0,4487
	1,25	0,2801	0,2994	0,3181	0,3363	0,3543	0,3723	0,3903	0,4083	0,4266	0,4454
	1,30	0,2746	0,2946	0,3137	0,3323	0,3505	0,3687	0,3868	0,4050	0,4234	0,4423
	1,35	0,2690	0,2899	0,3095	0,3284	0,3469	0,3653	0,3835	0,4019	0,4204	0,4393
	1,40	0,2632	0,2852	0,3054	0,3246	0,3434	0,3620	0,3804	0,3989	0,4176	0,4365
	1,45	0,2571	0,2805	0,3013	0,3210	0,3401	0,3589	0,3775	0,3961	0,4148	0,4339
	1,50	0,2504	0,2757	0,2974	0,3175	0,3369	0,3559	0,3746	0,3934	0,4122	0,4314
0,25	1,00	0,3253	0,3423	0,3592	0,3761	0,3930	0,4100	0,4272	0,4446	0,4624	0,4805
	1,05	0,3177	0,3352	0,3525	0,3697	0,3869	0,4041	0,4215	0,4391	0,4570	0,4759
	1,10	0,3100	0,3281	0,3459	0,3635	0,3810	0,3985	0,4161	0,4338	0,4520	0,4708
	1,15	0,3023	0,3212	0,3395	0,3575	0,3753	0,3931	0,4109	0,4289	0,4472	0,4661
	1,20	0,2944	0,3142	0,3332	0,3516	0,3698	0,3879	0,4060	0,4241	0,4426	0,4616
	1,25	0,2859	0,3071	0,3269	0,3459	0,3645	0,3829	0,4012	0,4196	0,4382	0,4574
	1,30	0,2764	0,2998	0,3206	0,3403	0,3593	0,3781	0,3967	0,4153	0,4341	0,4534
	1,35	0,2644	0,2920	0,3142	0,3347	0,3543	0,3734	0,3923	0,4111	0,4301	0,4495
	1,40		0,2832	0,3077	0,3291	0,3493	0,3688	0,3880	0,4071	0,4263	0,4459
	1,45		0,2725	0,3007	0,3235	0,3444	0,3644	0,3839	0,4033	0,4227	0,4424
	1,50			0,2932	0,3178	0,3395	0,3601	0,3800	0,3996	0,4192	0,4390
0,3	1,00	0,3447	0,3613	0,3779	0,3945	0,4111	0,4278	0,4447	0,4618	0,4797	0,4878
	1,05	0,3360	0,3532	0,3702	0,3871	0,4040	0,4210	0,4382	0,4556	0,4735	0,4852
	1,10	0,3272	0,3450	0,3625	0,3799	0,3972	0,4145	0,4319	0,4495	0,4677	0,4828
	1,15	0,3180	0,3367	0,3549	0,3727	0,3904	0,4081	0,4258	0,4437	0,4620	0,4806
	1,20	0,3080	0,3281	0,3471	0,3656	0,3838	0,4019	0,4199	0,4381	0,4566	0,4760
	1,25	0,2967	0,3190	0,3392	0,3585	0,3773	0,3958	0,4142	0,4327	0,4514	0,4709
	1,30	0,2814	0,3089	0,3310	0,3513	0,3708	0,3898	0,4086	0,4274	0,4464	0,4660
	1,35	0,2486	0,2966	0,3221	0,3439	0,3643	0,3839	0,4031	0,4223	0,4416	0,4614
	1,40		0,2505	0,3121	0,3362	0,3577	0,3780	0,3978	0,4173	0,4369	0,4568
	1,45			0,2993	0,3278	0,3509	0,3721	0,3924	0,4124	0,4323	0,4525
	1,50				0,3184	0,3438	0,3662	0,3872	0,4076	0,4278	0,4483

μ_{lu} pour S 500 A ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 6

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1363	0,1454	0,1548	0,1645	0,1743	0,1844	0,1947	0,2053	0,2161	0,2271
0,05	1,00	0,1518	0,1626	0,1735	0,1846	0,1958	0,2072	0,2189	0,2307	0,2427	0,2549
	1,05	0,1490	0,1598	0,1707	0,1818	0,1931	0,2045	0,2161	0,2280	0,2400	0,2522
	1,10	0,1464	0,1573	0,1682	0,1793	0,1906	0,2020	0,2136	0,2254	0,2374	0,2496
	1,15	0,1440	0,1549	0,1659	0,1770	0,1883	0,1997	0,2113	0,2231	0,2351	0,2473
	1,20	0,1418	0,1527	0,1637	0,1749	0,1861	0,1976	0,2092	0,2210	0,2330	0,2452
	1,25	0,1397	0,1506	0,1617	0,1728	0,1841	0,1956	0,2072	0,2190	0,2310	0,2432
	1,30	0,1377	0,1487	0,1598	0,1710	0,1823	0,1937	0,2054	0,2172	0,2291	0,2413
	1,35	0,1358	0,1469	0,1580	0,1692	0,1805	0,1920	0,2036	0,2154	0,2274	0,2396
	1,40	0,1341	0,1452	0,1563	0,1676	0,1789	0,1904	0,2020	0,2138	0,2258	0,2380
	1,45	0,1324	0,1436	0,1547	0,1660	0,1774	0,1889	0,2005	0,2123	0,2243	0,2365
	1,50	0,1308	0,1420	0,1533	0,1645	0,1759	0,1874	0,1991	0,2109	0,2229	0,2351
0,1	1,00	0,1785	0,1904	0,2024	0,2145	0,2268	0,2392	0,2518	0,2645	0,2775	0,2906
	1,05	0,1722	0,1843	0,1964	0,2086	0,2210	0,2334	0,2460	0,2588	0,2718	0,2849
	1,10	0,1662	0,1785	0,1907	0,2031	0,2155	0,2280	0,2407	0,2535	0,2664	0,2796
	1,15	0,1602	0,1728	0,1853	0,1978	0,2103	0,2229	0,2356	0,2484	0,2615	0,2746
	1,20	0,1542	0,1672	0,1800	0,1927	0,2053	0,2180	0,2308	0,2437	0,2568	0,2700
	1,25	0,1481	0,1617	0,1749	0,1878	0,2006	0,2134	0,2263	0,2393	0,2524	0,2656
	1,30	0,1417	0,1562	0,1698	0,1830	0,1960	0,2090	0,2220	0,2350	0,2482	0,2615
	1,35	0,1345	0,1505	0,1648	0,1784	0,1916	0,2048	0,2179	0,2310	0,2442	0,2576
	1,40	0,1251	0,1445	0,1597	0,1738	0,1873	0,2007	0,2139	0,2272	0,2405	0,2539
	1,45		0,1377	0,1545	0,1692	0,1832	0,1967	0,2102	0,2235	0,2369	0,2504
	1,50		0,1287	0,1490	0,1647	0,1791	0,1929	0,2065	0,2200	0,2335	0,2471
0,15	1,00	0,2139	0,2263	0,2389	0,2516	0,2644	0,2774	0,2906	0,3039	0,3175	0,3313
	1,05	0,2052	0,2178	0,2304	0,2432	0,2561	0,2691	0,2823	0,2957	0,3093	0,3230
	1,10	0,1966	0,2094	0,2222	0,2351	0,2481	0,2612	0,2745	0,2879	0,3015	0,3153
	1,15	0,1879	0,2011	0,2142	0,2272	0,2404	0,2536	0,2670	0,2805	0,2941	0,3080
	1,20	0,1789	0,1927	0,2062	0,2195	0,2329	0,2463	0,2598	0,2734	0,2871	0,3010
	1,25	0,1691	0,1839	0,1981	0,2119	0,2255	0,2392	0,2528	0,2665	0,2804	0,2943
	1,30	0,1572	0,1745	0,1897	0,2042	0,2183	0,2322	0,2460	0,2599	0,2739	0,2880
	1,35	0,1377	0,1631	0,1807	0,1962	0,2109	0,2253	0,2394	0,2535	0,2677	0,2818
	1,40	0,1325	0,1380	0,1701	0,1877	0,2034	0,2183	0,2329	0,2473	0,2616	0,2759
	1,45	0,1240	0,1323	0,1528	0,1781	0,1955	0,2113	0,2264	0,2411	0,2557	0,2702
	1,50		0,1187	0,1321	0,1652	0,1869	0,2040	0,2198	0,2350	0,2499	0,2647
0,2	1,00	0,2521	0,2649	0,2778	0,2909	0,3041	0,3176	0,3312	0,3450	0,3590	0,3733
	1,05	0,2421	0,2549	0,2678	0,2809	0,2942	0,3076	0,3212	0,3350	0,3490	0,3633
	1,10	0,2322	0,2451	0,2581	0,2713	0,2846	0,2980	0,3117	0,3255	0,3395	0,3537
	1,15	0,2223	0,2354	0,2486	0,2618	0,2752	0,2888	0,3024	0,3163	0,3304	0,3446
	1,20	0,2122	0,2257	0,2391	0,2525	0,2661	0,2797	0,2935	0,3075	0,3216	0,3359
	1,25	0,2016	0,2156	0,2295	0,2433	0,2570	0,2709	0,2848	0,2989	0,3131	0,3275
	1,30	0,1896	0,2049	0,2195	0,2338	0,2480	0,2621	0,2763	0,2905	0,3048	0,3193
	1,35	0,1785	0,1927	0,2088	0,2240	0,2388	0,2533	0,2678	0,2822	0,2968	0,3114
	1,40	0,1741	0,1791	0,1965	0,2134	0,2292	0,2444	0,2593	0,2741	0,2888	0,3037
	1,45	0,1693	0,1745	0,1796	0,2011	0,2188	0,2350	0,2506	0,2659	0,2810	0,2960
	1,50	0,1638	0,1694	0,1749	0,1818	0,2067	0,2250	0,2416	0,2575	0,2731	0,2885
0,25	1,00	0,2892	0,3024	0,3158	0,3293	0,3429	0,3568	0,3708	0,3850	0,3995	0,4142
	1,05	0,2785	0,2917	0,3050	0,3184	0,3320	0,3458	0,3598	0,3740	0,3884	0,4030
	1,10	0,2680	0,2812	0,2945	0,3079	0,3215	0,3352	0,3492	0,3633	0,3777	0,3923
	1,15	0,2577	0,2708	0,2841	0,2976	0,3112	0,3250	0,3389	0,3531	0,3674	0,3820
	1,20	0,2472	0,2605	0,2739	0,2875	0,3011	0,3149	0,3289	0,3431	0,3575	0,3721
	1,25	0,2366	0,2501	0,2637	0,2774	0,2912	0,3051	0,3192	0,3334	0,3478	0,3625
	1,30	0,2254	0,2394	0,2533	0,2672	0,2812	0,2953	0,3095	0,3239	0,3384	0,3531
	1,35	0,2168	0,2279	0,2425	0,2568	0,2712	0,2855	0,3000	0,3145	0,3291	0,3440
	1,40	0,2123	0,2175	0,2308	0,2460	0,2609	0,2756	0,2904	0,3051	0,3200	0,3350
	1,45	0,2079	0,2130	0,2183	0,2340	0,2499	0,2654	0,2806	0,2957	0,3109	0,3261
	1,50	0,2032	0,2085	0,2137	0,2198	0,2379	0,2545	0,2705	0,2862	0,3017	0,3172
0,3	1,00	0,3236	0,3373	0,3511	0,3650	0,3791	0,3933	0,4077	0,4223	0,4372	0,4524
	1,05	0,3127	0,3263	0,3400	0,3538	0,3678	0,3819	0,3962	0,4108	0,4255	0,4406
	1,10	0,3020	0,3155	0,3291	0,3429	0,3568	0,3708	0,3851	0,3996	0,4143	0,4293
	1,15	0,2914	0,3049	0,3184	0,3322	0,3460	0,3601	0,3743	0,3887	0,4034	0,4183
	1,20	0,2810	0,2944	0,3079	0,3216	0,3355	0,3495	0,3637	0,3781	0,3928	0,4077
	1,25	0,2704	0,2839	0,2975	0,3112	0,3251	0,3392	0,3534	0,3678	0,3824	0,3973
	1,30	0,2597	0,2733	0,2870	0,3008	0,3148	0,3289	0,3432	0,3577	0,3723	0,3873
	1,35	0,2524	0,2623	0,2763	0,2903	0,3044	0,3187	0,3331	0,3476	0,3624	0,3774
	1,40	0,2479	0,2534	0,2652	0,2796	0,2940	0,3084	0,3230	0,3377	0,3526	0,3676
	1,45	0,2434	0,2489	0,2544	0,2683	0,2831	0,2979	0,3128	0,3277	0,3428	0,3580
	1,50	0,2389	0,2444	0,2498	0,2560	0,2717	0,2871	0,3023	0,3176	0,3329	0,3484

μ_{lu} pour S 500 A ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 9

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1774	0,1886	0,2001	0,2118	0,2237	0,2359	0,2483	0,2610	0,2739	0,2871
0,05	1,00	0,1890	0,2015	0,2142	0,2271	0,2401	0,2534	0,2669	0,2806	0,2945	0,3087
	1,05	0,1868	0,1994	0,2121	0,2250	0,2380	0,2513	0,2648	0,2785	0,2924	0,3066
	1,10	0,1849	0,1974	0,2101	0,2230	0,2361	0,2494	0,2628	0,2765	0,2905	0,3046
	1,15	0,1830	0,1956	0,2083	0,2212	0,2343	0,2476	0,2611	0,2748	0,2887	0,3028
	1,20	0,1814	0,1939	0,2067	0,2196	0,2327	0,2459	0,2594	0,2731	0,2870	0,3012
	1,25	0,1798	0,1924	0,2051	0,2181	0,2312	0,2444	0,2579	0,2716	0,2855	0,2997
	1,30	0,1783	0,1910	0,2037	0,2166	0,2297	0,2430	0,2565	0,2702	0,2841	0,2982
	1,35	0,1770	0,1896	0,2024	0,2153	0,2284	0,2417	0,2552	0,2689	0,2828	0,2969
	1,40	0,1757	0,1884	0,2011	0,2141	0,2272	0,2405	0,2540	0,2677	0,2816	0,2957
	1,45	0,1745	0,1872	0,2000	0,2129	0,2260	0,2393	0,2528	0,2665	0,2804	0,2946
	1,50	0,1734	0,1861	0,1989	0,2118	0,2250	0,2383	0,2517	0,2654	0,2793	0,2935
0,1	1,00	0,2073	0,2210	0,2348	0,2487	0,2627	0,2768	0,2912	0,3057	0,3204	0,3354
	1,05	0,2023	0,2161	0,2300	0,2440	0,2580	0,2722	0,2866	0,3012	0,3159	0,3309
	1,10	0,1975	0,2115	0,2255	0,2396	0,2537	0,2680	0,2824	0,2970	0,3118	0,3268
	1,15	0,1929	0,2071	0,2213	0,2354	0,2497	0,2640	0,2785	0,2931	0,3079	0,3229
	1,20	0,1885	0,2030	0,2173	0,2315	0,2459	0,2603	0,2748	0,2894	0,3043	0,3193
	1,25	0,1843	0,1990	0,2135	0,2279	0,2423	0,2568	0,2713	0,2860	0,3009	0,3160
	1,30	0,1802	0,1951	0,2098	0,2244	0,2389	0,2534	0,2681	0,2828	0,2978	0,3129
	1,35	0,1761	0,1914	0,2063	0,2211	0,2357	0,2503	0,2650	0,2798	0,2948	0,3099
	1,40	0,1721	0,1878	0,2030	0,2179	0,2326	0,2474	0,2621	0,2770	0,2920	0,3072
	1,45	0,1681	0,1843	0,1998	0,2149	0,2297	0,2446	0,2594	0,2743	0,2894	0,3046
	1,50	0,1640	0,1809	0,1967	0,2119	0,2270	0,2419	0,2568	0,2718	0,2869	0,3021
0,15	1,00	0,2333	0,2475	0,2619	0,2763	0,2908	0,3055	0,3204	0,3354	0,3506	0,3661
	1,05	0,2255	0,2400	0,2545	0,2691	0,2838	0,2986	0,3135	0,3286	0,3439	0,3595
	1,10	0,2178	0,2327	0,2475	0,2623	0,2771	0,2920	0,3071	0,3222	0,3376	0,3532
	1,15	0,2101	0,2255	0,2406	0,2557	0,2707	0,2858	0,3009	0,3162	0,3317	0,3473
	1,20	0,2023	0,2183	0,2339	0,2493	0,2646	0,2798	0,2951	0,3105	0,3261	0,3418
	1,25	0,1940	0,2111	0,2273	0,2431	0,2586	0,2741	0,2896	0,3051	0,3207	0,3365
	1,30	0,1848	0,2036	0,2207	0,2369	0,2528	0,2686	0,2842	0,2999	0,3157	0,3316
	1,35	0,1730	0,1956	0,2139	0,2309	0,2472	0,2632	0,2791	0,2949	0,3108	0,3269
	1,40		0,1865	0,2069	0,2248	0,2416	0,2580	0,2741	0,2902	0,3062	0,3224
	1,45		0,1736	0,1994	0,2186	0,2361	0,2529	0,2694	0,2856	0,3018	0,3181
	1,50			0,1907	0,2122	0,2306	0,2479	0,2647	0,2812	0,2976	0,3139
0,2	1,00	0,2642	0,2786	0,2931	0,3077	0,3225	0,3374	0,3525	0,3678	0,3833	0,3992
	1,05	0,2547	0,2693	0,2840	0,2988	0,3137	0,3287	0,3439	0,3593	0,3749	0,3907
	1,10	0,2451	0,2601	0,2751	0,2901	0,3051	0,3203	0,3356	0,3511	0,3668	0,3827
	1,15	0,2354	0,2509	0,2662	0,2815	0,2968	0,3122	0,3277	0,3433	0,3591	0,3751
	1,20	0,2251	0,2415	0,2574	0,2731	0,2887	0,3044	0,3200	0,3358	0,3517	0,3679
	1,25	0,2138	0,2316	0,2484	0,2647	0,2807	0,2967	0,3126	0,3286	0,3447	0,3609
	1,30	0,1997	0,2208	0,2390	0,2562	0,2728	0,2891	0,3053	0,3216	0,3378	0,3543
	1,35	0,1781	0,2076	0,2289	0,2473	0,2647	0,2816	0,2982	0,3147	0,3312	0,3478
	1,40	0,1711	0,1787	0,2169	0,2379	0,2565	0,2741	0,2912	0,3080	0,3248	0,3416
	1,45	0,1480	0,1709	0,1968	0,2272	0,2478	0,2664	0,2841	0,3014	0,3185	0,3356
	1,50			0,1704	0,2129	0,2383	0,2585	0,2770	0,2949	0,3123	0,3297
0,25	1,00	0,2966	0,3110	0,3256	0,3403	0,3551	0,3701	0,3853	0,4008	0,4165	0,4325
	1,05	0,2861	0,3007	0,3154	0,3302	0,3451	0,3602	0,3755	0,3910	0,4068	0,4229
	1,10	0,2757	0,2905	0,3054	0,3204	0,3355	0,3507	0,3661	0,3817	0,3975	0,4137
	1,15	0,2652	0,2803	0,2955	0,3107	0,3260	0,3414	0,3569	0,3726	0,3886	0,4048
	1,20	0,2542	0,2699	0,2855	0,3011	0,3166	0,3322	0,3480	0,3638	0,3799	0,3963
	1,25	0,2424	0,2591	0,2753	0,2914	0,3073	0,3232	0,3392	0,3553	0,3715	0,3880
	1,30	0,2285	0,2472	0,2646	0,2814	0,2979	0,3142	0,3305	0,3469	0,3633	0,3800
	1,35	0,2164	0,2332	0,2529	0,2710	0,2883	0,3052	0,3219	0,3386	0,3553	0,3722
	1,40	0,2109	0,2173	0,2390	0,2596	0,2782	0,2959	0,3133	0,3304	0,3474	0,3645
	1,45	0,2046	0,2115	0,2182	0,2461	0,2673	0,2863	0,3044	0,3221	0,3396	0,3570
	1,50	0,1956	0,2045	0,2121	0,2231	0,2545	0,2759	0,2953	0,3137	0,3317	0,3496
0,3	1,00	0,3279	0,3424	0,3570	0,3718	0,3867	0,4018	0,4170	0,4326	0,4484	0,4647
	1,05	0,3172	0,3317	0,3464	0,3612	0,3762	0,3913	0,4067	0,4222	0,4381	0,4544
	1,10	0,3065	0,3212	0,3360	0,3509	0,3659	0,3812	0,3966	0,4122	0,4281	0,4444
	1,15	0,2958	0,3107	0,3256	0,3407	0,3558	0,3712	0,3867	0,4024	0,4184	0,4348
	1,20	0,2848	0,3000	0,3152	0,3305	0,3459	0,3614	0,3770	0,3929	0,4090	0,4254
	1,25	0,2733	0,2890	0,3046	0,3202	0,3359	0,3516	0,3675	0,3835	0,3998	0,4163
	1,30	0,2608	0,2774	0,2937	0,3098	0,3258	0,3419	0,3580	0,3743	0,3907	0,4074
	1,35	0,2521	0,2646	0,2820	0,2989	0,3155	0,3320	0,3485	0,3651	0,3818	0,3986
	1,40	0,2469	0,2532	0,2689	0,2873	0,3048	0,3220	0,3389	0,3559	0,3729	0,3900
	1,45	0,2415	0,2479	0,2543	0,2740	0,2932	0,3114	0,3291	0,3466	0,3640	0,3814
	1,50	0,2356	0,2423	0,2489	0,2568	0,2801	0,3001	0,3189	0,3371	0,3550	0,3729

μ_{lu} pour S 500 A ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 12

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2082	0,2207	0,2334	0,2465	0,2597	0,2732	0,2869	0,3009	0,3152	0,3297
0,05	1,00	0,2174	0,2310	0,2448	0,2588	0,2730	0,2874	0,3020	0,3168	0,3319	0,3473
	1,05	0,2157	0,2293	0,2431	0,2571	0,2713	0,2857	0,3003	0,3151	0,3302	0,3456
	1,10	0,2141	0,2277	0,2415	0,2555	0,2697	0,2841	0,2987	0,3136	0,3286	0,3440
	1,15	0,2126	0,2262	0,2401	0,2541	0,2683	0,2827	0,2973	0,3121	0,3272	0,3426
	1,20	0,2112	0,2249	0,2387	0,2527	0,2669	0,2813	0,2960	0,3108	0,3259	0,3412
	1,25	0,2100	0,2237	0,2375	0,2515	0,2657	0,2801	0,2947	0,3096	0,3247	0,3400
	1,30	0,2088	0,2225	0,2363	0,2504	0,2646	0,2790	0,2936	0,3084	0,3235	0,3389
	1,35	0,2077	0,2214	0,2353	0,2493	0,2635	0,2779	0,2925	0,3074	0,3225	0,3378
	1,40	0,2067	0,2204	0,2343	0,2483	0,2625	0,2769	0,2916	0,3064	0,3215	0,3368
	1,45	0,2057	0,2195	0,2333	0,2474	0,2616	0,2760	0,2906	0,3055	0,3206	0,3359
	1,50	0,2049	0,2186	0,2325	0,2465	0,2607	0,2752	0,2898	0,3046	0,3197	0,3351
0,1	1,00	0,2313	0,2460	0,2607	0,2756	0,2906	0,3058	0,3211	0,3367	0,3525	0,3685
	1,05	0,2271	0,2420	0,2568	0,2718	0,2869	0,3021	0,3174	0,3330	0,3488	0,3649
	1,10	0,2233	0,2382	0,2532	0,2682	0,2833	0,2986	0,3140	0,3296	0,3455	0,3615
	1,15	0,2197	0,2347	0,2498	0,2649	0,2801	0,2954	0,3109	0,3265	0,3424	0,3585
	1,20	0,2162	0,2314	0,2466	0,2618	0,2770	0,2924	0,3079	0,3236	0,3395	0,3556
	1,25	0,2130	0,2283	0,2436	0,2589	0,2742	0,2896	0,3052	0,3209	0,3368	0,3529
	1,30	0,2099	0,2254	0,2408	0,2561	0,2715	0,2870	0,3026	0,3183	0,3343	0,3504
	1,35	0,2069	0,2226	0,2381	0,2535	0,2690	0,2845	0,3002	0,3160	0,3319	0,3481
	1,40	0,2041	0,2200	0,2356	0,2511	0,2666	0,2822	0,2979	0,3137	0,3297	0,3459
	1,45	0,2014	0,2174	0,2332	0,2488	0,2644	0,2800	0,2958	0,3116	0,3277	0,3439
	1,50	0,1988	0,2150	0,2309	0,2466	0,2623	0,2780	0,2937	0,3096	0,3257	0,3420
0,15	1,00	0,2510	0,2663	0,2817	0,2972	0,3127	0,3284	0,3442	0,3602	0,3764	0,3930
	1,05	0,2442	0,2599	0,2755	0,2911	0,3068	0,3226	0,3385	0,3546	0,3709	0,3875
	1,10	0,2377	0,2537	0,2696	0,2854	0,3012	0,3171	0,3332	0,3493	0,3657	0,3824
	1,15	0,2313	0,2477	0,2639	0,2799	0,2959	0,3120	0,3281	0,3444	0,3609	0,3776
	1,20	0,2250	0,2419	0,2584	0,2747	0,2909	0,3071	0,3234	0,3398	0,3563	0,3731
	1,25	0,2186	0,2362	0,2531	0,2697	0,2861	0,3025	0,3189	0,3354	0,3520	0,3689
	1,30	0,2121	0,2305	0,2479	0,2649	0,2815	0,2981	0,3146	0,3312	0,3480	0,3649
	1,35	0,2053	0,2248	0,2429	0,2602	0,2771	0,2939	0,3106	0,3273	0,3441	0,3611
	1,40	0,1977	0,2191	0,2379	0,2556	0,2728	0,2898	0,3067	0,3235	0,3405	0,3576
	1,45	0,1886	0,2131	0,2329	0,2512	0,2687	0,2859	0,3030	0,3200	0,3370	0,3542
	1,50		0,2066	0,2278	0,2468	0,2647	0,2822	0,2994	0,3166	0,3337	0,3510
0,2	1,00	0,2759	0,2914	0,3070	0,3226	0,3383	0,3542	0,3702	0,3864	0,4029	0,4197
	1,05	0,2671	0,2830	0,2989	0,3147	0,3306	0,3466	0,3628	0,3791	0,3957	0,4126
	1,10	0,2584	0,2747	0,2909	0,3071	0,3232	0,3394	0,3557	0,3722	0,3889	0,4059
	1,15	0,2495	0,2665	0,2832	0,2996	0,3161	0,3325	0,3490	0,3656	0,3825	0,3996
	1,20	0,2402	0,2581	0,2754	0,2924	0,3091	0,3258	0,3426	0,3594	0,3763	0,3935
	1,25	0,2301	0,2495	0,2677	0,2852	0,3024	0,3194	0,3363	0,3533	0,3705	0,3878
	1,30	0,2179	0,2403	0,2598	0,2780	0,2957	0,3131	0,3303	0,3476	0,3649	0,3823
	1,35	0,1771	0,2299	0,2515	0,2708	0,2891	0,3069	0,3245	0,3420	0,3595	0,3771
	1,40		0,2162	0,2425	0,2634	0,2825	0,3009	0,3188	0,3366	0,3543	0,3721
	1,45			0,2321	0,2556	0,2759	0,2949	0,3133	0,3313	0,3493	0,3673
	1,50			0,2166	0,2471	0,2691	0,2889	0,3078	0,3262	0,3445	0,3626
0,25	1,00	0,3037	0,3191	0,3346	0,3501	0,3658	0,3816	0,3977	0,4139	0,4304	0,4474
	1,05	0,2938	0,3095	0,3252	0,3410	0,3569	0,3729	0,3890	0,4054	0,4220	0,4391
	1,10	0,2838	0,2999	0,3160	0,3320	0,3482	0,3644	0,3807	0,3972	0,4140	0,4312
	1,15	0,2735	0,2903	0,3068	0,3232	0,3396	0,3561	0,3727	0,3894	0,4063	0,4236
	1,20	0,2626	0,2803	0,2975	0,3144	0,3312	0,3480	0,3648	0,3818	0,3989	0,4163
	1,25	0,2504	0,2698	0,2880	0,3056	0,3229	0,3401	0,3572	0,3744	0,3917	0,4093
	1,30	0,2348	0,2581	0,2780	0,2966	0,3145	0,3322	0,3497	0,3672	0,3848	0,4026
	1,35	0,2159	0,2434	0,2669	0,2871	0,3060	0,3243	0,3423	0,3602	0,3780	0,3960
	1,40	0,2081	0,2169	0,2536	0,2769	0,2972	0,3164	0,3349	0,3532	0,3714	0,3896
	1,45		0,2081	0,2180	0,2651	0,2879	0,3082	0,3275	0,3463	0,3649	0,3834
	1,50			0,2079	0,2483	0,2774	0,2997	0,3200	0,3395	0,3585	0,3774
0,3	1,00	0,3320	0,3472	0,3625	0,3779	0,3934	0,4091	0,4250	0,4411	0,4577	0,4749
	1,05	0,3216	0,3370	0,3525	0,3681	0,3838	0,3996	0,4157	0,4320	0,4486	0,4658
	1,10	0,3112	0,3269	0,3426	0,3584	0,3743	0,3904	0,4066	0,4230	0,4398	0,4571
	1,15	0,3005	0,3167	0,3328	0,3489	0,3650	0,3813	0,3977	0,4144	0,4313	0,4486
	1,20	0,2893	0,3061	0,3228	0,3393	0,3558	0,3724	0,3890	0,4059	0,4230	0,4405
	1,25	0,2771	0,2950	0,3124	0,3296	0,3465	0,3635	0,3805	0,3976	0,4149	0,4325
	1,30	0,2626	0,2828	0,3015	0,3195	0,3371	0,3546	0,3719	0,3894	0,4069	0,4248
	1,35	0,2517	0,2682	0,2895	0,3089	0,3275	0,3455	0,3634	0,3812	0,3991	0,4172
	1,40	0,2456	0,2529	0,2751	0,2973	0,3173	0,3363	0,3548	0,3731	0,3914	0,4098
	1,45	0,2383	0,2465	0,2542	0,2834	0,3062	0,3266	0,3460	0,3650	0,3837	0,4025
	1,50	0,2264	0,2384	0,2474	0,2602	0,2932	0,3162	0,3369	0,3567	0,3760	0,3952

μ_{lu} pour S 500 A ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 15

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2319	0,2453	0,2589	0,2728	0,2869	0,3012	0,3158	0,3307	0,3458	0,3612
0,05	1,00	0,2396	0,2540	0,2685	0,2832	0,2981	0,3132	0,3285	0,3441	0,3599	0,3760
	1,05	0,2381	0,2525	0,2670	0,2817	0,2966	0,3117	0,3271	0,3426	0,3584	0,3746
	1,10	0,2368	0,2512	0,2657	0,2804	0,2953	0,3104	0,3258	0,3413	0,3571	0,3733
	1,15	0,2355	0,2499	0,2645	0,2792	0,2941	0,3092	0,3246	0,3401	0,3559	0,3721
	1,20	0,2344	0,2488	0,2634	0,2781	0,2930	0,3081	0,3234	0,3390	0,3548	0,3710
	1,25	0,2333	0,2478	0,2623	0,2771	0,2920	0,3071	0,3224	0,3380	0,3538	0,3700
	1,30	0,2324	0,2468	0,2614	0,2761	0,2910	0,3061	0,3215	0,3370	0,3529	0,3690
	1,35	0,2315	0,2459	0,2605	0,2752	0,2901	0,3053	0,3206	0,3362	0,3520	0,3681
	1,40	0,2306	0,2450	0,2596	0,2744	0,2893	0,3044	0,3198	0,3354	0,3512	0,3673
	1,45	0,2298	0,2443	0,2588	0,2736	0,2885	0,3037	0,3190	0,3346	0,3504	0,3666
	1,50	0,2291	0,2435	0,2581	0,2729	0,2878	0,3030	0,3183	0,3339	0,3497	0,3659
0,1	1,00	0,2507	0,2660	0,2814	0,2969	0,3125	0,3283	0,3442	0,3604	0,3768	0,3936
	1,05	0,2472	0,2626	0,2781	0,2937	0,3093	0,3252	0,3412	0,3574	0,3738	0,3906
	1,10	0,2440	0,2595	0,2751	0,2907	0,3064	0,3223	0,3383	0,3545	0,3710	0,3878
	1,15	0,2410	0,2566	0,2722	0,2879	0,3037	0,3196	0,3357	0,3519	0,3684	0,3852
	1,20	0,2382	0,2539	0,2696	0,2853	0,3012	0,3171	0,3332	0,3495	0,3660	0,3829
	1,25	0,2356	0,2514	0,2671	0,2829	0,2988	0,3148	0,3309	0,3473	0,3638	0,3807
	1,30	0,2331	0,2490	0,2648	0,2807	0,2966	0,3126	0,3288	0,3452	0,3618	0,3786
	1,35	0,2308	0,2467	0,2627	0,2786	0,2946	0,3106	0,3268	0,3432	0,3598	0,3767
	1,40	0,2285	0,2446	0,2606	0,2766	0,2926	0,3087	0,3250	0,3414	0,3580	0,3749
	1,45	0,2264	0,2426	0,2587	0,2747	0,2908	0,3070	0,3232	0,3397	0,3563	0,3732
	1,50	0,2244	0,2407	0,2569	0,2730	0,2891	0,3053	0,3216	0,3381	0,3547	0,3717
0,15	1,00	0,2663	0,2823	0,2983	0,3144	0,3305	0,3467	0,3631	0,3797	0,3966	0,4137
	1,05	0,2605	0,2768	0,2930	0,3092	0,3255	0,3418	0,3583	0,3750	0,3919	0,4091
	1,10	0,2550	0,2715	0,2880	0,3043	0,3207	0,3372	0,3538	0,3706	0,3876	0,4049
	1,15	0,2497	0,2665	0,2832	0,2998	0,3163	0,3329	0,3496	0,3665	0,3835	0,4009
	1,20	0,2445	0,2617	0,2786	0,2954	0,3121	0,3288	0,3457	0,3626	0,3797	0,3971
	1,25	0,2394	0,2571	0,2743	0,2913	0,3082	0,3250	0,3419	0,3590	0,3762	0,3936
	1,30	0,2344	0,2526	0,2701	0,2873	0,3044	0,3214	0,3384	0,3555	0,3728	0,3904
	1,35	0,2295	0,2482	0,2661	0,2836	0,3008	0,3179	0,3351	0,3523	0,3697	0,3873
	1,40	0,2245	0,2439	0,2622	0,2799	0,2974	0,3147	0,3319	0,3493	0,3667	0,3844
	1,45	0,2194	0,2397	0,2584	0,2765	0,2941	0,3116	0,3289	0,3464	0,3639	0,3816
	1,50	0,2141	0,2355	0,2548	0,2731	0,2910	0,3086	0,3261	0,3436	0,3612	0,3790
0,2	1,00	0,2866	0,3029	0,3191	0,3354	0,3517	0,3681	0,3847	0,4015	0,4185	0,4360
	1,05	0,2788	0,2954	0,3119	0,3284	0,3450	0,3616	0,3783	0,3952	0,4124	0,4299
	1,10	0,2709	0,2881	0,3050	0,3218	0,3386	0,3554	0,3723	0,3893	0,4066	0,4243
	1,15	0,2631	0,2809	0,2982	0,3154	0,3324	0,3494	0,3665	0,3837	0,4012	0,4189
	1,20	0,2551	0,2737	0,2916	0,3091	0,3265	0,3437	0,3610	0,3784	0,3960	0,4138
	1,25	0,2466	0,2664	0,2850	0,3030	0,3207	0,3383	0,3558	0,3734	0,3911	0,4090
	1,30	0,2373	0,2589	0,2785	0,2971	0,3152	0,3330	0,3508	0,3685	0,3864	0,4045
	1,35	0,2259	0,2510	0,2719	0,2912	0,3098	0,3279	0,3459	0,3639	0,3819	0,4002
	1,40		0,2423	0,2651	0,2853	0,3044	0,3230	0,3413	0,3595	0,3777	0,3960
	1,45		0,2316	0,2579	0,2794	0,2992	0,3182	0,3368	0,3552	0,3736	0,3921
	1,50			0,2501	0,2734	0,2940	0,3135	0,3324	0,3511	0,3697	0,3883
0,25	1,00	0,3105	0,3266	0,3427	0,3589	0,3751	0,3915	0,4080	0,4247	0,4418	0,4595
	1,05	0,3012	0,3177	0,3342	0,3506	0,3671	0,3837	0,4004	0,4173	0,4345	0,4523
	1,10	0,2919	0,3089	0,3258	0,3425	0,3593	0,3761	0,3931	0,4102	0,4276	0,4454
	1,15	0,2822	0,3000	0,3174	0,3346	0,3517	0,3689	0,3860	0,4034	0,4209	0,4389
	1,20	0,2719	0,2908	0,3090	0,3268	0,3443	0,3618	0,3792	0,3968	0,4145	0,4326
	1,25	0,2603	0,2812	0,3005	0,3189	0,3370	0,3548	0,3726	0,3904	0,4084	0,4267
	1,30	0,2454	0,2706	0,2916	0,3110	0,3297	0,3480	0,3662	0,3843	0,4025	0,4209
	1,35	0,2150	0,2578	0,2820	0,3029	0,3224	0,3413	0,3599	0,3783	0,3968	0,4154
	1,40	0,1953	0,2162	0,2711	0,2943	0,3150	0,3346	0,3537	0,3725	0,3912	0,4101
	1,45			0,2564	0,2849	0,3073	0,3279	0,3475	0,3668	0,3858	0,4049
	1,50				0,2739	0,2992	0,3210	0,3414	0,3611	0,3806	0,3999
0,3	1,00	0,3359	0,3516	0,3674	0,3833	0,3993	0,4154	0,4318	0,4484	0,4654	0,4814
	1,05	0,3260	0,3421	0,3581	0,3743	0,3905	0,4069	0,4234	0,4402	0,4573	0,4753
	1,10	0,3159	0,3324	0,3489	0,3654	0,3819	0,3985	0,4153	0,4322	0,4496	0,4676
	1,15	0,3055	0,3227	0,3396	0,3565	0,3734	0,3903	0,4073	0,4245	0,4421	0,4601
	1,20	0,2944	0,3125	0,3302	0,3477	0,3650	0,3822	0,3996	0,4170	0,4348	0,4530
	1,25	0,2818	0,3017	0,3205	0,3387	0,3565	0,3742	0,3919	0,4097	0,4277	0,4461
	1,30	0,2656	0,2895	0,3101	0,3294	0,3480	0,3662	0,3844	0,4025	0,4208	0,4394
	1,35	0,2512	0,2740	0,2986	0,3196	0,3392	0,3582	0,3769	0,3954	0,4140	0,4328
	1,40	0,2434	0,2525	0,2843	0,3088	0,3301	0,3500	0,3693	0,3884	0,4073	0,4265
	1,45	0,2263	0,2439	0,2540	0,2961	0,3202	0,3415	0,3617	0,3813	0,4008	0,4202
	1,50			0,2443	0,2763	0,3090	0,3326	0,3539	0,3743	0,3942	0,4141

μ_{lu} pour S 500 A ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 18

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2507	0,2648	0,2790	0,2934	0,3081	0,3230	0,3382	0,3536	0,3693	0,3853
0,05	1,00	0,2573	0,2722	0,2872	0,3024	0,3177	0,3333	0,3491	0,3651	0,3814	0,3981
	1,05	0,2560	0,2709	0,2859	0,3011	0,3165	0,3321	0,3478	0,3639	0,3802	0,3968
	1,10	0,2549	0,2698	0,2848	0,3000	0,3154	0,3309	0,3467	0,3628	0,3791	0,3957
	1,15	0,2538	0,2687	0,2837	0,2989	0,3143	0,3299	0,3457	0,3617	0,3781	0,3947
	1,20	0,2528	0,2677	0,2828	0,2980	0,3134	0,3289	0,3447	0,3608	0,3771	0,3938
	1,25	0,2519	0,2668	0,2819	0,2971	0,3125	0,3281	0,3439	0,3599	0,3763	0,3929
	1,30	0,2511	0,2660	0,2810	0,2963	0,3117	0,3273	0,3431	0,3591	0,3755	0,3921
	1,35	0,2503	0,2652	0,2803	0,2955	0,3109	0,3265	0,3423	0,3584	0,3747	0,3914
	1,40	0,2496	0,2645	0,2796	0,2948	0,3102	0,3258	0,3416	0,3577	0,3740	0,3907
	1,45	0,2489	0,2638	0,2789	0,2941	0,3095	0,3251	0,3410	0,3570	0,3734	0,3900
	1,50	0,2483	0,2632	0,2783	0,2935	0,3089	0,3245	0,3404	0,3564	0,3728	0,3894
0,1	1,00	0,2665	0,2822	0,2980	0,3139	0,3299	0,3461	0,3624	0,3790	0,3958	0,4130
	1,05	0,2636	0,2793	0,2952	0,3111	0,3272	0,3434	0,3598	0,3764	0,3932	0,4104
	1,10	0,2608	0,2767	0,2926	0,3086	0,3247	0,3409	0,3573	0,3740	0,3909	0,4081
	1,15	0,2583	0,2742	0,2902	0,3062	0,3224	0,3386	0,3551	0,3717	0,3887	0,4059
	1,20	0,2559	0,2719	0,2879	0,3040	0,3202	0,3365	0,3530	0,3697	0,3866	0,4039
	1,25	0,2537	0,2698	0,2859	0,3020	0,3182	0,3346	0,3511	0,3678	0,3848	0,4021
	1,30	0,2516	0,2678	0,2839	0,3001	0,3164	0,3327	0,3493	0,3660	0,3830	0,4003
	1,35	0,2497	0,2659	0,2821	0,2983	0,3146	0,3310	0,3476	0,3644	0,3814	0,3987
	1,40	0,2478	0,2641	0,2804	0,2966	0,3130	0,3294	0,3460	0,3628	0,3799	0,3972
	1,45	0,2461	0,2624	0,2787	0,2951	0,3115	0,3279	0,3446	0,3614	0,3784	0,3958
	1,50	0,2444	0,2609	0,2772	0,2936	0,3100	0,3265	0,3432	0,3600	0,3771	0,3945
0,15	1,00	0,2793	0,2957	0,3121	0,3285	0,3450	0,3616	0,3783	0,3953	0,4125	0,4301
	1,05	0,2743	0,2909	0,3075	0,3240	0,3406	0,3573	0,3742	0,3912	0,4085	0,4262
	1,10	0,2696	0,2864	0,3031	0,3199	0,3366	0,3534	0,3703	0,3874	0,4048	0,4225
	1,15	0,2650	0,2821	0,2991	0,3159	0,3328	0,3497	0,3667	0,3839	0,4014	0,4191
	1,20	0,2607	0,2781	0,2952	0,3122	0,3292	0,3462	0,3634	0,3806	0,3981	0,4160
	1,25	0,2565	0,2742	0,2916	0,3087	0,3259	0,3430	0,3602	0,3776	0,3951	0,4130
	1,30	0,2525	0,2705	0,2881	0,3054	0,3227	0,3399	0,3572	0,3747	0,3923	0,4102
	1,35	0,2486	0,2669	0,2847	0,3023	0,3197	0,3371	0,3545	0,3720	0,3897	0,4076
	1,40	0,2447	0,2635	0,2816	0,2993	0,3168	0,3343	0,3518	0,3694	0,3872	0,4052
	1,45	0,2410	0,2602	0,2785	0,2964	0,3141	0,3317	0,3493	0,3670	0,3848	0,4029
	1,50	0,2372	0,2569	0,2756	0,2937	0,3116	0,3293	0,3469	0,3647	0,3826	0,4007
0,2	1,00	0,2962	0,3129	0,3296	0,3462	0,3629	0,3797	0,3966	0,4137	0,4312	0,4491
	1,05	0,2892	0,3063	0,3232	0,3401	0,3570	0,3740	0,3910	0,4083	0,4259	0,4438
	1,10	0,2823	0,2998	0,3171	0,3343	0,3514	0,3686	0,3858	0,4032	0,4209	0,4389
	1,15	0,2754	0,2935	0,3112	0,3287	0,3461	0,3634	0,3808	0,3984	0,4162	0,4343
	1,20	0,2685	0,2873	0,3055	0,3233	0,3409	0,3585	0,3761	0,3938	0,4117	0,4300
	1,25	0,2615	0,2812	0,2999	0,3181	0,3360	0,3539	0,3716	0,3895	0,4076	0,4259
	1,30	0,2541	0,2750	0,2944	0,3131	0,3313	0,3494	0,3674	0,3854	0,4036	0,4221
	1,35	0,2462	0,2688	0,2890	0,3082	0,3268	0,3451	0,3633	0,3815	0,3998	0,4184
	1,40	0,2369	0,2623	0,2836	0,3033	0,3224	0,3410	0,3594	0,3778	0,3962	0,4149
	1,45	0,2231	0,2554	0,2781	0,2986	0,3181	0,3370	0,3557	0,3742	0,3928	0,4116
	1,50		0,2477	0,2726	0,2939	0,3139	0,3332	0,3520	0,3708	0,3895	0,4085
0,25	1,00	0,3168	0,3334	0,3499	0,3665	0,3831	0,3998	0,4167	0,4337	0,4512	0,4694
	1,05	0,3082	0,3253	0,3422	0,3590	0,3759	0,3928	0,4099	0,4272	0,4448	0,4630
	1,10	0,2996	0,3172	0,3346	0,3518	0,3690	0,3862	0,4035	0,4209	0,4387	0,4570
	1,15	0,2907	0,3091	0,3270	0,3447	0,3622	0,3797	0,3973	0,4150	0,4329	0,4514
	1,20	0,2813	0,3009	0,3195	0,3377	0,3557	0,3735	0,3913	0,4092	0,4274	0,4459
	1,25	0,2709	0,2923	0,3120	0,3309	0,3493	0,3675	0,3856	0,4037	0,4221	0,4408
	1,30	0,2582	0,2831	0,3042	0,3240	0,3430	0,3616	0,3800	0,3984	0,4170	0,4359
	1,35	0,2134	0,2726	0,2961	0,3170	0,3367	0,3558	0,3746	0,3933	0,4121	0,4311
	1,40		0,2588	0,2874	0,3098	0,3304	0,3501	0,3693	0,3884	0,4074	0,4266
	1,45			0,2772	0,3024	0,3241	0,3445	0,3642	0,3835	0,4028	0,4223
	1,50			0,2634	0,2943	0,3177	0,3389	0,3591	0,3789	0,3984	0,4181
0,3	1,00	0,3396	0,3558	0,3719	0,3882	0,4045	0,4209	0,4375	0,4544	0,4718	0,4843
	1,05	0,3302	0,3468	0,3633	0,3798	0,3964	0,4131	0,4300	0,4471	0,4647	0,4813
	1,10	0,3206	0,3377	0,3547	0,3717	0,3886	0,4056	0,4227	0,4400	0,4578	0,4763
	1,15	0,3105	0,3285	0,3461	0,3635	0,3808	0,3982	0,4156	0,4332	0,4511	0,4697
	1,20	0,2998	0,3189	0,3374	0,3554	0,3732	0,3909	0,4086	0,4265	0,4447	0,4634
	1,25	0,2874	0,3087	0,3283	0,3472	0,3656	0,3837	0,4019	0,4200	0,4384	0,4573
	1,30	0,2705	0,2971	0,3188	0,3387	0,3579	0,3766	0,3952	0,4137	0,4324	0,4515
	1,35	0,2505	0,2823	0,3082	0,3299	0,3501	0,3695	0,3886	0,4075	0,4265	0,4458
	1,40	0,2382	0,2519	0,2955	0,3204	0,3420	0,3624	0,3820	0,4014	0,4207	0,4403
	1,45		0,2355	0,2725	0,3095	0,3335	0,3550	0,3755	0,3954	0,4151	0,4350
	1,50			0,2309	0,2954	0,3243	0,3475	0,3688	0,3894	0,4095	0,4297

μ_{lu} pour S 500 A ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 21

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2660	0,2805	0,2951	0,3100	0,3251	0,3404	0,3559	0,3717	0,3878	0,4043
0,05	1,00	0,2717	0,2869	0,3023	0,3178	0,3335	0,3493	0,3654	0,3818	0,3984	0,4154
	1,05	0,2706	0,2858	0,3012	0,3167	0,3324	0,3483	0,3644	0,3807	0,3974	0,4144
	1,10	0,2696	0,2848	0,3002	0,3157	0,3314	0,3473	0,3634	0,3797	0,3964	0,4134
	1,15	0,2687	0,2839	0,2993	0,3148	0,3305	0,3464	0,3625	0,3788	0,3955	0,4125
	1,20	0,2678	0,2830	0,2984	0,3139	0,3297	0,3456	0,3617	0,3780	0,3947	0,4117
	1,25	0,2670	0,2823	0,2976	0,3132	0,3289	0,3448	0,3609	0,3773	0,3939	0,4110
	1,30	0,2663	0,2815	0,2969	0,3125	0,3282	0,3441	0,3602	0,3766	0,3933	0,4103
	1,35	0,2656	0,2809	0,2962	0,3118	0,3275	0,3434	0,3596	0,3759	0,3926	0,4096
	1,40	0,2650	0,2802	0,2956	0,3112	0,3269	0,3428	0,3589	0,3753	0,3920	0,4090
	1,45	0,2644	0,2796	0,2950	0,3106	0,3263	0,3422	0,3584	0,3748	0,3914	0,4085
	1,50	0,2638	0,2791	0,2945	0,3101	0,3258	0,3417	0,3579	0,3742	0,3909	0,4080
0,1	1,00	0,2796	0,2955	0,3116	0,3277	0,3440	0,3604	0,3770	0,3938	0,4109	0,4284
	1,05	0,2770	0,2930	0,3091	0,3253	0,3416	0,3580	0,3747	0,3915	0,4087	0,4262
	1,10	0,2746	0,2907	0,3069	0,3231	0,3394	0,3559	0,3726	0,3894	0,4066	0,4242
	1,15	0,2724	0,2886	0,3048	0,3210	0,3374	0,3539	0,3706	0,3875	0,4047	0,4223
	1,20	0,2704	0,2866	0,3028	0,3191	0,3355	0,3521	0,3688	0,3858	0,4030	0,4206
	1,25	0,2685	0,2847	0,3010	0,3174	0,3338	0,3504	0,3671	0,3841	0,4013	0,4190
	1,30	0,2667	0,2830	0,2993	0,3157	0,3322	0,3488	0,3656	0,3826	0,3998	0,4175
	1,35	0,2650	0,2814	0,2978	0,3142	0,3307	0,3473	0,3642	0,3812	0,3984	0,4161
	1,40	0,2634	0,2799	0,2963	0,3128	0,3293	0,3460	0,3628	0,3798	0,3971	0,4148
	1,45	0,2619	0,2784	0,2949	0,3114	0,3280	0,3447	0,3615	0,3786	0,3959	0,4136
	1,50	0,2605	0,2771	0,2936	0,3101	0,3267	0,3435	0,3603	0,3774	0,3947	0,4124
0,15	1,00	0,2903	0,3070	0,3236	0,3402	0,3569	0,3737	0,3907	0,4078	0,4253	0,4432
	1,05	0,2860	0,3028	0,3195	0,3363	0,3531	0,3700	0,3870	0,4043	0,4218	0,4398
	1,10	0,2818	0,2988	0,3158	0,3326	0,3496	0,3666	0,3837	0,4010	0,4186	0,4366
	1,15	0,2779	0,2951	0,3122	0,3292	0,3463	0,3634	0,3806	0,3980	0,4156	0,4337
	1,20	0,2742	0,2916	0,3089	0,3260	0,3432	0,3604	0,3777	0,3951	0,4129	0,4310
	1,25	0,2707	0,2883	0,3057	0,3230	0,3403	0,3576	0,3749	0,3925	0,4103	0,4284
	1,30	0,2673	0,2852	0,3028	0,3202	0,3376	0,3549	0,3724	0,3900	0,4078	0,4260
	1,35	0,2640	0,2822	0,2999	0,3175	0,3350	0,3525	0,3700	0,3877	0,4056	0,4238
	1,40	0,2609	0,2793	0,2972	0,3150	0,3325	0,3501	0,3677	0,3855	0,4034	0,4217
	1,45	0,2579	0,2765	0,2947	0,3125	0,3302	0,3479	0,3656	0,3834	0,4014	0,4197
	1,50	0,2549	0,2739	0,2922	0,3102	0,3281	0,3458	0,3636	0,3814	0,3995	0,4179
0,2	1,00	0,3047	0,3217	0,3386	0,3554	0,3723	0,3893	0,4065	0,4238	0,4415	0,4597
	1,05	0,2984	0,3157	0,3329	0,3500	0,3671	0,3843	0,4016	0,4190	0,4368	0,4551
	1,10	0,2922	0,3100	0,3275	0,3449	0,3622	0,3795	0,3970	0,4146	0,4325	0,4509
	1,15	0,2862	0,3045	0,3223	0,3399	0,3575	0,3750	0,3926	0,4104	0,4284	0,4469
	1,20	0,2803	0,2991	0,3173	0,3353	0,3530	0,3708	0,3885	0,4064	0,4245	0,4431
	1,25	0,2743	0,2938	0,3125	0,3308	0,3488	0,3667	0,3846	0,4027	0,4209	0,4395
	1,30	0,2683	0,2886	0,3078	0,3264	0,3447	0,3629	0,3809	0,3991	0,4175	0,4362
	1,35	0,2621	0,2835	0,3032	0,3222	0,3408	0,3592	0,3774	0,3958	0,4142	0,4331
	1,40	0,2556	0,2783	0,2988	0,3182	0,3371	0,3557	0,3741	0,3926	0,4112	0,4301
	1,45	0,2484	0,2731	0,2944	0,3143	0,3335	0,3523	0,3709	0,3895	0,4082	0,4272
	1,50	0,2397	0,2677	0,2900	0,3104	0,3300	0,3490	0,3679	0,3866	0,4055	0,4245
0,25	1,00	0,3226	0,3395	0,3563	0,3731	0,3900	0,4069	0,4240	0,4413	0,4590	0,4776
	1,05	0,3147	0,3320	0,3493	0,3664	0,3835	0,4007	0,4179	0,4354	0,4533	0,4720
	1,10	0,3067	0,3247	0,3424	0,3599	0,3773	0,3947	0,4122	0,4299	0,4479	0,4666
	1,15	0,2986	0,3174	0,3356	0,3535	0,3713	0,3890	0,4067	0,4246	0,4428	0,4616
	1,20	0,2902	0,3100	0,3289	0,3473	0,3655	0,3835	0,4015	0,4196	0,4380	0,4569
	1,25	0,2811	0,3024	0,3222	0,3412	0,3598	0,3782	0,3964	0,4148	0,4333	0,4524
	1,30	0,2706	0,2945	0,3155	0,3352	0,3543	0,3730	0,3916	0,4102	0,4289	0,4481
	1,35	0,2563	0,2860	0,3086	0,3292	0,3489	0,3680	0,3869	0,4057	0,4247	0,4440
	1,40		0,2760	0,3014	0,3232	0,3435	0,3631	0,3824	0,4015	0,4206	0,4401
	1,45		0,2621	0,2937	0,3171	0,3382	0,3584	0,3780	0,3973	0,4167	0,4363
	1,50			0,2850	0,3107	0,3329	0,3537	0,3737	0,3933	0,4129	0,4327
0,3	1,00	0,3431	0,3595	0,3760	0,3925	0,4090	0,4256	0,4425	0,4596	0,4773	0,4868
	1,05	0,3341	0,3511	0,3680	0,3848	0,4017	0,4186	0,4356	0,4530	0,4708	0,4840
	1,10	0,3250	0,3427	0,3600	0,3773	0,3945	0,4117	0,4290	0,4466	0,4646	0,4815
	1,15	0,3155	0,3340	0,3521	0,3698	0,3874	0,4050	0,4227	0,4405	0,4587	0,4778
	1,20	0,3053	0,3251	0,3440	0,3624	0,3805	0,3985	0,4164	0,4345	0,4530	0,4722
	1,25	0,2935	0,3156	0,3358	0,3549	0,3736	0,3921	0,4104	0,4288	0,4475	0,4668
	1,30	0,2774	0,3050	0,3271	0,3474	0,3668	0,3857	0,4045	0,4232	0,4421	0,4616
	1,35	0,2494	0,2918	0,3177	0,3395	0,3598	0,3794	0,3987	0,4178	0,4370	0,4566
	1,40		0,2511	0,3068	0,3312	0,3528	0,3732	0,3929	0,4124	0,4319	0,4518
	1,45			0,2918	0,3221	0,3455	0,3668	0,3872	0,4072	0,4271	0,4472
	1,50				0,3114	0,3378	0,3604	0,3816	0,4020	0,4223	0,4427

μ_{lu} pour S 500 A ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 24

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2787	0,2934	0,3084	0,3235	0,3389	0,3544	0,3703	0,3863	0,4027	0,4195
0,05	1,00	0,2837	0,2991	0,3147	0,3304	0,3463	0,3624	0,3787	0,3953	0,4121	0,4294
	1,05	0,2827	0,2981	0,3137	0,3295	0,3454	0,3614	0,3778	0,3943	0,4112	0,4285
	1,10	0,2818	0,2972	0,3128	0,3286	0,3445	0,3606	0,3769	0,3935	0,4104	0,4277
	1,15	0,2810	0,2964	0,3120	0,3278	0,3437	0,3598	0,3761	0,3927	0,4096	0,4269
	1,20	0,2802	0,2957	0,3113	0,3270	0,3429	0,3591	0,3754	0,3920	0,4089	0,4262
	1,25	0,2795	0,2950	0,3106	0,3263	0,3423	0,3584	0,3747	0,3913	0,4082	0,4255
	1,30	0,2789	0,2943	0,3099	0,3257	0,3416	0,3578	0,3741	0,3907	0,4076	0,4249
	1,35	0,2783	0,2937	0,3093	0,3251	0,3411	0,3572	0,3735	0,3901	0,4070	0,4244
	1,40	0,2777	0,2932	0,3088	0,3246	0,3405	0,3566	0,3730	0,3896	0,4065	0,4238
	1,45	0,2772	0,2927	0,3083	0,3241	0,3400	0,3561	0,3725	0,3891	0,4060	0,4233
	1,50	0,2767	0,2922	0,3078	0,3236	0,3395	0,3557	0,3720	0,3886	0,4056	0,4229
0,1	1,00	0,2905	0,3066	0,3228	0,3391	0,3555	0,3721	0,3888	0,4058	0,4231	0,4409
	1,05	0,2882	0,3044	0,3207	0,3370	0,3534	0,3700	0,3868	0,4038	0,4212	0,4390
	1,10	0,2861	0,3024	0,3187	0,3350	0,3515	0,3681	0,3850	0,4020	0,4194	0,4372
	1,15	0,2842	0,3005	0,3168	0,3332	0,3497	0,3664	0,3833	0,4003	0,4177	0,4355
	1,20	0,2824	0,2987	0,3151	0,3316	0,3481	0,3648	0,3817	0,3988	0,4162	0,4340
	1,25	0,2807	0,2971	0,3135	0,3300	0,3466	0,3633	0,3802	0,3973	0,4148	0,4326
	1,30	0,2791	0,2956	0,3120	0,3286	0,3452	0,3619	0,3789	0,3960	0,4134	0,4313
	1,35	0,2777	0,2941	0,3106	0,3272	0,3439	0,3606	0,3776	0,3947	0,4122	0,4301
	1,40	0,2763	0,2928	0,3094	0,3259	0,3426	0,3594	0,3764	0,3936	0,4111	0,4289
	1,45	0,2750	0,2916	0,3081	0,3248	0,3415	0,3583	0,3753	0,3925	0,4100	0,4279
	1,50	0,2738	0,2904	0,3070	0,3237	0,3404	0,3572	0,3743	0,3915	0,4090	0,4269
0,15	1,00	0,2998	0,3165	0,3332	0,3500	0,3668	0,3837	0,4008	0,4181	0,4358	0,4540
	1,05	0,2959	0,3128	0,3297	0,3465	0,3635	0,3805	0,3976	0,4150	0,4327	0,4509
	1,10	0,2922	0,3093	0,3263	0,3433	0,3603	0,3774	0,3947	0,4121	0,4299	0,4482
	1,15	0,2888	0,3061	0,3232	0,3403	0,3574	0,3746	0,3919	0,4095	0,4273	0,4456
	1,20	0,2856	0,3030	0,3203	0,3375	0,3547	0,3720	0,3894	0,4070	0,4248	0,4432
	1,25	0,2825	0,3001	0,3175	0,3349	0,3522	0,3695	0,3870	0,4047	0,4226	0,4409
	1,30	0,2796	0,2974	0,3149	0,3324	0,3498	0,3672	0,3848	0,4025	0,4205	0,4389
	1,35	0,2768	0,2948	0,3125	0,3300	0,3475	0,3651	0,3827	0,4004	0,4185	0,4369
	1,40	0,2741	0,2923	0,3102	0,3278	0,3454	0,3630	0,3807	0,3985	0,4166	0,4351
	1,45	0,2716	0,2900	0,3080	0,3257	0,3434	0,3611	0,3788	0,3967	0,4148	0,4333
	1,50	0,2691	0,2877	0,3059	0,3238	0,3415	0,3593	0,3771	0,3950	0,4132	0,4317
0,2	1,00	0,3121	0,3293	0,3463	0,3633	0,3803	0,3974	0,4147	0,4322	0,4500	0,4686
	1,05	0,3064	0,3239	0,3412	0,3584	0,3757	0,3929	0,4103	0,4279	0,4459	0,4645
	1,10	0,3010	0,3188	0,3364	0,3539	0,3713	0,3887	0,4062	0,4240	0,4420	0,4607
	1,15	0,2957	0,3139	0,3318	0,3495	0,3671	0,3847	0,4024	0,4203	0,4384	0,4571
	1,20	0,2905	0,3092	0,3274	0,3454	0,3632	0,3810	0,3988	0,4168	0,4350	0,4538
	1,25	0,2853	0,3046	0,3232	0,3414	0,3594	0,3774	0,3954	0,4135	0,4319	0,4507
	1,30	0,2803	0,3001	0,3191	0,3376	0,3559	0,3740	0,3922	0,4104	0,4289	0,4478
	1,35	0,2752	0,2957	0,3152	0,3340	0,3525	0,3708	0,3891	0,4075	0,4260	0,4450
	1,40	0,2700	0,2914	0,3114	0,3305	0,3493	0,3678	0,3862	0,4047	0,4233	0,4424
	1,45	0,2647	0,2872	0,3077	0,3272	0,3461	0,3648	0,3834	0,4020	0,4208	0,4399
	1,50	0,2591	0,2829	0,3040	0,3239	0,3432	0,3621	0,3808	0,3995	0,4184	0,4376
0,25	1,00	0,3278	0,3449	0,3620	0,3789	0,3959	0,4130	0,4301	0,4476	0,4655	0,4818
	1,05	0,3205	0,3381	0,3555	0,3728	0,3900	0,4073	0,4247	0,4424	0,4604	0,4795
	1,10	0,3132	0,3314	0,3493	0,3669	0,3844	0,4020	0,4196	0,4374	0,4556	0,4747
	1,15	0,3059	0,3248	0,3432	0,3612	0,3791	0,3969	0,4147	0,4327	0,4511	0,4702
	1,20	0,2983	0,3182	0,3372	0,3557	0,3739	0,3920	0,4101	0,4283	0,4468	0,4660
	1,25	0,2904	0,3115	0,3312	0,3503	0,3689	0,3873	0,4056	0,4240	0,4427	0,4620
	1,30	0,2817	0,3047	0,3254	0,3450	0,3640	0,3827	0,4013	0,4200	0,4388	0,4582
	1,35	0,2713	0,2975	0,3194	0,3397	0,3593	0,3783	0,3972	0,4161	0,4351	0,4546
	1,40	0,2543	0,2897	0,3134	0,3346	0,3546	0,3741	0,3932	0,4123	0,4315	0,4512
	1,45		0,2808	0,3071	0,3294	0,3501	0,3699	0,3894	0,4087	0,4281	0,4479
	1,50		0,2685	0,3005	0,3242	0,3456	0,3659	0,3857	0,4053	0,4249	0,4448
0,3	1,00	0,3463	0,3630	0,3797	0,3963	0,4130	0,4298	0,4467	0,4639	0,4808	0,4888
	1,05	0,3379	0,3551	0,3722	0,3892	0,4062	0,4233	0,4405	0,4580	0,4760	0,4863
	1,10	0,3293	0,3472	0,3648	0,3823	0,3997	0,4170	0,4345	0,4522	0,4705	0,4840
	1,15	0,3203	0,3392	0,3575	0,3755	0,3932	0,4110	0,4287	0,4467	0,4651	0,4819
	1,20	0,3107	0,3310	0,3501	0,3687	0,3870	0,4051	0,4232	0,4414	0,4600	0,4796
	1,25	0,2998	0,3222	0,3426	0,3619	0,3807	0,3993	0,4177	0,4363	0,4551	0,4748
	1,30	0,2855	0,3127	0,3348	0,3551	0,3746	0,3936	0,4125	0,4313	0,4504	0,4701
	1,35	0,2475	0,3013	0,3264	0,3481	0,3684	0,3880	0,4073	0,4265	0,4458	0,4657
	1,40		0,2833	0,3172	0,3409	0,3622	0,3825	0,4022	0,4218	0,4414	0,4615
	1,45			0,3059	0,3332	0,3559	0,3770	0,3973	0,4172	0,4371	0,4574
	1,50				0,3247	0,3494	0,3715	0,3923	0,4127	0,4329	0,4534

μ_{lu} pour S 500 A ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 27

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2893	0,3042	0,3194	0,3348	0,3503	0,3661	0,3821	0,3984	0,4150	0,4320
0,05	1,00	0,2938	0,3093	0,3251	0,3410	0,3570	0,3732	0,3897	0,4064	0,4234	0,4409
	1,05	0,2929	0,3085	0,3242	0,3401	0,3561	0,3724	0,3888	0,4055	0,4226	0,4401
	1,10	0,2920	0,3077	0,3234	0,3393	0,3554	0,3716	0,3881	0,4048	0,4218	0,4394
	1,15	0,2913	0,3069	0,3227	0,3386	0,3546	0,3709	0,3873	0,4041	0,4211	0,4387
	1,20	0,2906	0,3062	0,3220	0,3379	0,3540	0,3702	0,3867	0,4034	0,4205	0,4380
	1,25	0,2900	0,3056	0,3214	0,3373	0,3534	0,3696	0,3861	0,4028	0,4199	0,4374
	1,30	0,2894	0,3050	0,3208	0,3367	0,3528	0,3691	0,3856	0,4023	0,4194	0,4369
	1,35	0,2889	0,3045	0,3203	0,3362	0,3523	0,3686	0,3850	0,4018	0,4189	0,4364
	1,40	0,2884	0,3040	0,3198	0,3357	0,3518	0,3681	0,3846	0,4013	0,4184	0,4359
	1,45	0,2879	0,3035	0,3193	0,3353	0,3513	0,3676	0,3841	0,4009	0,4180	0,4355
	1,50	0,2874	0,3031	0,3189	0,3348	0,3509	0,3672	0,3837	0,4005	0,4176	0,4351
0,1	1,00	0,2998	0,3160	0,3323	0,3487	0,3652	0,3818	0,3987	0,4158	0,4332	0,4512
	1,05	0,2977	0,3140	0,3303	0,3468	0,3633	0,3800	0,3969	0,4140	0,4315	0,4495
	1,10	0,2958	0,3122	0,3286	0,3450	0,3616	0,3783	0,3952	0,4124	0,4299	0,4479
	1,15	0,2941	0,3105	0,3269	0,3434	0,3600	0,3768	0,3937	0,4109	0,4284	0,4464
	1,20	0,2925	0,3089	0,3254	0,3419	0,3586	0,3753	0,3923	0,4095	0,4270	0,4451
	1,25	0,2910	0,3075	0,3240	0,3405	0,3572	0,3740	0,3910	0,4082	0,4258	0,4438
	1,30	0,2896	0,3061	0,3226	0,3393	0,3560	0,3728	0,3898	0,4070	0,4246	0,4427
	1,35	0,2883	0,3048	0,3214	0,3381	0,3548	0,3716	0,3887	0,4059	0,4235	0,4416
	1,40	0,2871	0,3037	0,3203	0,3369	0,3537	0,3706	0,3876	0,4049	0,4225	0,4406
	1,45	0,2859	0,3026	0,3192	0,3359	0,3527	0,3696	0,3866	0,4039	0,4216	0,4396
	1,50	0,2849	0,3015	0,3182	0,3349	0,3517	0,3686	0,3857	0,4030	0,4207	0,4387
0,15	1,00	0,3078	0,3247	0,3415	0,3583	0,3752	0,3922	0,4093	0,4267	0,4445	0,4629
	1,05	0,3044	0,3213	0,3383	0,3552	0,3722	0,3893	0,4065	0,4239	0,4418	0,4602
	1,10	0,3011	0,3182	0,3353	0,3523	0,3694	0,3865	0,4039	0,4214	0,4392	0,4577
	1,15	0,2981	0,3153	0,3325	0,3496	0,3668	0,3840	0,4014	0,4190	0,4369	0,4554
	1,20	0,2952	0,3126	0,3299	0,3471	0,3644	0,3817	0,3991	0,4168	0,4348	0,4533
	1,25	0,2925	0,3100	0,3274	0,3448	0,3621	0,3795	0,3970	0,4147	0,4327	0,4513
	1,30	0,2899	0,3076	0,3252	0,3426	0,3600	0,3775	0,3950	0,4128	0,4309	0,4494
	1,35	0,2875	0,3053	0,3230	0,3405	0,3580	0,3756	0,3932	0,4110	0,4291	0,4477
	1,40	0,2852	0,3032	0,3209	0,3386	0,3562	0,3738	0,3914	0,4093	0,4275	0,4461
	1,45	0,2830	0,3011	0,3190	0,3367	0,3544	0,3721	0,3898	0,4077	0,4259	0,4446
	1,50	0,2809	0,2992	0,3172	0,3350	0,3527	0,3705	0,3883	0,4062	0,4244	0,4431
0,2	1,00	0,3186	0,3359	0,3530	0,3701	0,3872	0,4043	0,4216	0,4392	0,4571	0,4760
	1,05	0,3135	0,3310	0,3484	0,3657	0,3830	0,4003	0,4177	0,4354	0,4535	0,4723
	1,10	0,3086	0,3264	0,3441	0,3616	0,3790	0,3965	0,4141	0,4319	0,4500	0,4689
	1,15	0,3038	0,3220	0,3399	0,3577	0,3753	0,3929	0,4106	0,4286	0,4468	0,4657
	1,20	0,2992	0,3178	0,3360	0,3540	0,3718	0,3896	0,4074	0,4254	0,4438	0,4628
	1,25	0,2948	0,3138	0,3323	0,3504	0,3685	0,3864	0,4044	0,4225	0,4410	0,4600
	1,30	0,2904	0,3099	0,3287	0,3471	0,3653	0,3834	0,4015	0,4198	0,4383	0,4574
	1,35	0,2861	0,3061	0,3253	0,3439	0,3623	0,3806	0,3988	0,4172	0,4358	0,4549
	1,40	0,2818	0,3024	0,3219	0,3409	0,3595	0,3779	0,3963	0,4147	0,4334	0,4526
	1,45	0,2775	0,2988	0,3188	0,3380	0,3567	0,3753	0,3938	0,4124	0,4312	0,4505
	1,50	0,2732	0,2953	0,3157	0,3351	0,3541	0,3729	0,3915	0,4102	0,4291	0,4484
0,25	1,00	0,3325	0,3498	0,3669	0,3840	0,4011	0,4182	0,4354	0,4530	0,4710	0,4842
	1,05	0,3258	0,3435	0,3610	0,3784	0,3957	0,4131	0,4306	0,4483	0,4665	0,4823
	1,10	0,3191	0,3374	0,3553	0,3730	0,3906	0,4082	0,4259	0,4438	0,4621	0,4806
	1,15	0,3125	0,3314	0,3498	0,3679	0,3858	0,4036	0,4215	0,4396	0,4581	0,4775
	1,20	0,3057	0,3255	0,3444	0,3629	0,3811	0,3992	0,4173	0,4356	0,4542	0,4737
	1,25	0,2987	0,3195	0,3391	0,3581	0,3766	0,3950	0,4134	0,4318	0,4506	0,4701
	1,30	0,2913	0,3135	0,3339	0,3534	0,3723	0,3910	0,4096	0,4282	0,4471	0,4667
	1,35	0,2831	0,3074	0,3287	0,3488	0,3681	0,3871	0,4059	0,4247	0,4438	0,4635
	1,40	0,2731	0,3010	0,3235	0,3442	0,3640	0,3833	0,4024	0,4214	0,4407	0,4604
	1,45		0,2941	0,3183	0,3398	0,3601	0,3797	0,3990	0,4183	0,4377	0,4575
	1,50		0,2864	0,3129	0,3354	0,3562	0,3762	0,3958	0,4153	0,4348	0,4548
0,3	1,00	0,3493	0,3662	0,3830	0,3997	0,4165	0,4334	0,4504	0,4677	0,4825	0,4906
	1,05	0,3413	0,3588	0,3760	0,3932	0,4103	0,4274	0,4447	0,4623	0,4802	0,4883
	1,10	0,3333	0,3514	0,3692	0,3868	0,4042	0,4217	0,4393	0,4571	0,4754	0,4862
	1,15	0,3249	0,3440	0,3624	0,3805	0,3984	0,4162	0,4340	0,4521	0,4706	0,4842
	1,20	0,3160	0,3364	0,3556	0,3743	0,3926	0,4108	0,4289	0,4473	0,4660	0,4823
	1,25	0,3060	0,3284	0,3488	0,3681	0,3870	0,4056	0,4241	0,4426	0,4616	0,4806
	1,30	0,2936	0,3198	0,3417	0,3620	0,3814	0,4005	0,4193	0,4382	0,4573	0,4774
	1,35	0,2436	0,3100	0,3343	0,3558	0,3759	0,3955	0,4147	0,4339	0,4532	0,4734
	1,40		0,2972	0,3264	0,3494	0,3705	0,3906	0,4102	0,4297	0,4493	0,4696
	1,45			0,3174	0,3428	0,3649	0,3857	0,4058	0,4256	0,4455	0,4660
	1,50			0,3058	0,3358	0,3593	0,3809	0,4015	0,4217	0,4418	0,4625

μ_{lu} pour S 500 A ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 6

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1514	0,1614	0,1716	0,1820	0,1927	0,2036	0,2147	0,2261	0,2377	0,2496
0,05	1,00	0,1653	0,1768	0,1884	0,2002	0,2122	0,2243	0,2367	0,2492	0,2620	0,2750
	1,05	0,1628	0,1743	0,1859	0,1977	0,2097	0,2218	0,2342	0,2467	0,2595	0,2725
	1,10	0,1605	0,1720	0,1836	0,1954	0,2074	0,2195	0,2319	0,2444	0,2572	0,2702
	1,15	0,1583	0,1698	0,1815	0,1933	0,2053	0,2174	0,2298	0,2423	0,2551	0,2681
	1,20	0,1563	0,1679	0,1795	0,1914	0,2033	0,2155	0,2278	0,2404	0,2531	0,2661
	1,25	0,1544	0,1660	0,1777	0,1895	0,2015	0,2137	0,2260	0,2386	0,2513	0,2643
	1,30	0,1527	0,1643	0,1760	0,1878	0,1999	0,2120	0,2244	0,2369	0,2497	0,2626
	1,35	0,1510	0,1627	0,1744	0,1863	0,1983	0,2105	0,2228	0,2354	0,2481	0,2611
	1,40	0,1494	0,1611	0,1729	0,1848	0,1968	0,2090	0,2214	0,2339	0,2466	0,2596
	1,45	0,1480	0,1597	0,1715	0,1834	0,1954	0,2076	0,2200	0,2325	0,2453	0,2582
	1,50	0,1466	0,1583	0,1702	0,1821	0,1941	0,2063	0,2187	0,2313	0,2440	0,2569
0,1	1,00	0,1886	0,2012	0,2139	0,2268	0,2397	0,2528	0,2661	0,2796	0,2932	0,3071
	1,05	0,1828	0,1955	0,2084	0,2213	0,2343	0,2475	0,2608	0,2743	0,2880	0,3018
	1,10	0,1771	0,1901	0,2031	0,2162	0,2293	0,2425	0,2559	0,2694	0,2831	0,2970
	1,15	0,1717	0,1850	0,1981	0,2113	0,2245	0,2378	0,2512	0,2648	0,2785	0,2924
	1,20	0,1663	0,1799	0,1933	0,2067	0,2200	0,2334	0,2469	0,2605	0,2742	0,2882
	1,25	0,1610	0,1750	0,1887	0,2022	0,2157	0,2292	0,2427	0,2564	0,2702	0,2842
	1,30	0,1556	0,1702	0,1842	0,1980	0,2116	0,2252	0,2389	0,2526	0,2665	0,2805
	1,35	0,1499	0,1654	0,1799	0,1939	0,2077	0,2214	0,2352	0,2490	0,2629	0,2770
	1,40	0,1438	0,1605	0,1755	0,1899	0,2039	0,2178	0,2317	0,2455	0,2595	0,2736
	1,45	0,1367	0,1555	0,1713	0,1860	0,2003	0,2143	0,2283	0,2423	0,2563	0,2705
	1,50	0,1252	0,1502	0,1670	0,1822	0,1968	0,2110	0,2251	0,2392	0,2533	0,2675
0,15	1,00	0,2205	0,2336	0,2468	0,2602	0,2737	0,2874	0,3012	0,3152	0,3294	0,3439
	1,05	0,2120	0,2253	0,2387	0,2522	0,2658	0,2795	0,2934	0,3075	0,3217	0,3362
	1,10	0,2036	0,2173	0,2309	0,2445	0,2582	0,2721	0,2861	0,3002	0,3145	0,3290
	1,15	0,1952	0,2093	0,2232	0,2371	0,2510	0,2650	0,2790	0,2933	0,3076	0,3222
	1,20	0,1864	0,2012	0,2156	0,2298	0,2439	0,2581	0,2723	0,2866	0,3011	0,3158
	1,25	0,1769	0,1928	0,2079	0,2226	0,2371	0,2515	0,2659	0,2803	0,2949	0,3096
	1,30	0,1654	0,1839	0,2001	0,2154	0,2303	0,2450	0,2596	0,2742	0,2889	0,3038
	1,35	0,1375	0,1735	0,1918	0,2081	0,2235	0,2386	0,2535	0,2684	0,2832	0,2982
	1,40	0,1303	0,1571	0,1825	0,2004	0,2167	0,2323	0,2476	0,2626	0,2777	0,2928
	1,45		0,1293	0,1705	0,1922	0,2098	0,2260	0,2417	0,2571	0,2724	0,2876
	1,50			0,1281	0,1825	0,2024	0,2197	0,2359	0,2516	0,2672	0,2826
0,2	1,00	0,2561	0,2695	0,2830	0,2967	0,3105	0,3245	0,3387	0,3531	0,3677	0,3826
	1,05	0,2462	0,2597	0,2733	0,2870	0,3009	0,3150	0,3292	0,3436	0,3582	0,3731
	1,10	0,2364	0,2500	0,2638	0,2777	0,2916	0,3058	0,3200	0,3345	0,3492	0,3641
	1,15	0,2264	0,2404	0,2544	0,2685	0,2826	0,2969	0,3112	0,3258	0,3405	0,3555
	1,20	0,2161	0,2307	0,2451	0,2594	0,2738	0,2882	0,3027	0,3174	0,3322	0,3473
	1,25	0,2051	0,2205	0,2355	0,2503	0,2650	0,2797	0,2944	0,3092	0,3242	0,3393
	1,30	0,1920	0,2095	0,2256	0,2410	0,2562	0,2713	0,2863	0,3013	0,3164	0,3317
	1,35	0,1784	0,1963	0,2147	0,2314	0,2473	0,2628	0,2782	0,2935	0,3088	0,3243
	1,40	0,1734	0,1790	0,2018	0,2209	0,2380	0,2543	0,2701	0,2858	0,3014	0,3171
	1,45	0,1675	0,1737	0,1796	0,2085	0,2279	0,2454	0,2619	0,2781	0,2941	0,3100
	1,50	0,1585	0,1672	0,1740	0,1866	0,2163	0,2359	0,2535	0,2704	0,2868	0,3030
0,25	1,00	0,2917	0,3053	0,3191	0,3330	0,3471	0,3614	0,3759	0,3906	0,4055	0,4207
	1,05	0,2810	0,2947	0,3085	0,3224	0,3365	0,3508	0,3653	0,3800	0,3949	0,4101
	1,10	0,2705	0,2843	0,2981	0,3121	0,3262	0,3406	0,3550	0,3697	0,3847	0,3999
	1,15	0,2600	0,2739	0,2879	0,3020	0,3162	0,3306	0,3451	0,3599	0,3748	0,3901
	1,20	0,2494	0,2635	0,2777	0,2919	0,3063	0,3208	0,3355	0,3503	0,3653	0,3806
	1,25	0,2383	0,2528	0,2674	0,2819	0,2965	0,3112	0,3260	0,3409	0,3561	0,3714
	1,30	0,2262	0,2416	0,2568	0,2717	0,2867	0,3016	0,3166	0,3317	0,3470	0,3625
	1,35	0,2167	0,2293	0,2455	0,2612	0,2766	0,2920	0,3073	0,3227	0,3381	0,3538
	1,40	0,2119	0,2174	0,2329	0,2499	0,2662	0,2822	0,2979	0,3136	0,3294	0,3452
	1,45	0,2070	0,2126	0,2182	0,2371	0,2550	0,2719	0,2883	0,3045	0,3206	0,3367
	1,50	0,2017	0,2075	0,2133	0,2202	0,2423	0,2609	0,2784	0,2952	0,3118	0,3283
0,3	1,00	0,3250	0,3390	0,3531	0,3673	0,3817	0,3963	0,4110	0,4259	0,4412	0,4568
	1,05	0,3142	0,3281	0,3421	0,3563	0,3707	0,3852	0,3999	0,4148	0,4300	0,4455
	1,10	0,3035	0,3174	0,3314	0,3456	0,3599	0,3744	0,3891	0,4040	0,4191	0,4346
	1,15	0,2929	0,3068	0,3208	0,3350	0,3493	0,3639	0,3786	0,3935	0,4086	0,4241
	1,20	0,2822	0,2962	0,3103	0,3246	0,3390	0,3535	0,3683	0,3832	0,3984	0,4139
	1,25	0,2713	0,2855	0,2998	0,3142	0,3287	0,3433	0,3582	0,3732	0,3884	0,4040
	1,30	0,2600	0,2745	0,2891	0,3037	0,3184	0,3332	0,3482	0,3633	0,3786	0,3942
	1,35	0,2523	0,2630	0,2780	0,2930	0,3080	0,3230	0,3382	0,3535	0,3690	0,3847
	1,40	0,2476	0,2533	0,2662	0,2818	0,2973	0,3127	0,3282	0,3437	0,3594	0,3753
	1,45	0,2429	0,2486	0,2544	0,2699	0,2861	0,3021	0,3180	0,3339	0,3499	0,3660
	1,50	0,2380	0,2438	0,2496	0,2562	0,2740	0,2909	0,3075	0,3239	0,3402	0,3566

μ_{lu} pour S 500 A ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 9

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1938	0,2058	0,2180	0,2304	0,2430	0,2559	0,2691	0,2825	0,2962	0,3101
0,05	1,00	0,2041	0,2172	0,2306	0,2441	0,2577	0,2716	0,2857	0,3001	0,3147	0,3295
	1,05	0,2022	0,2153	0,2287	0,2422	0,2559	0,2697	0,2839	0,2982	0,3128	0,3276
	1,10	0,2004	0,2136	0,2269	0,2404	0,2541	0,2680	0,2821	0,2964	0,3110	0,3258
	1,15	0,1988	0,2120	0,2253	0,2388	0,2525	0,2664	0,2805	0,2949	0,3094	0,3243
	1,20	0,1973	0,2105	0,2238	0,2373	0,2510	0,2649	0,2791	0,2934	0,3080	0,3228
	1,25	0,1959	0,2091	0,2225	0,2360	0,2497	0,2636	0,2777	0,2920	0,3066	0,3214
	1,30	0,1946	0,2078	0,2212	0,2347	0,2484	0,2623	0,2764	0,2908	0,3053	0,3202
	1,35	0,1934	0,2066	0,2200	0,2335	0,2472	0,2612	0,2753	0,2896	0,3042	0,3190
	1,40	0,1923	0,2055	0,2189	0,2324	0,2462	0,2601	0,2742	0,2885	0,3031	0,3179
	1,45	0,1912	0,2045	0,2178	0,2314	0,2451	0,2590	0,2732	0,2875	0,3021	0,3169
	1,50	0,1902	0,2035	0,2169	0,2304	0,2442	0,2581	0,2722	0,2865	0,3011	0,3159
0,1	1,00	0,2199	0,2342	0,2485	0,2630	0,2775	0,2923	0,3072	0,3223	0,3376	0,3531
	1,05	0,2154	0,2298	0,2442	0,2587	0,2734	0,2881	0,3031	0,3182	0,3335	0,3491
	1,10	0,2111	0,2256	0,2402	0,2548	0,2695	0,2843	0,2993	0,3145	0,3298	0,3454
	1,15	0,2071	0,2217	0,2364	0,2511	0,2659	0,2807	0,2958	0,3110	0,3264	0,3420
	1,20	0,2032	0,2181	0,2328	0,2476	0,2625	0,2774	0,2925	0,3077	0,3232	0,3388
	1,25	0,1995	0,2146	0,2295	0,2444	0,2593	0,2743	0,2894	0,3047	0,3202	0,3358
	1,30	0,1960	0,2112	0,2263	0,2413	0,2563	0,2714	0,2866	0,3019	0,3174	0,3331
	1,35	0,1926	0,2081	0,2233	0,2384	0,2535	0,2686	0,2839	0,2992	0,3147	0,3305
	1,40	0,1893	0,2050	0,2204	0,2356	0,2508	0,2660	0,2813	0,2967	0,3123	0,3280
	1,45	0,1861	0,2021	0,2177	0,2330	0,2483	0,2636	0,2789	0,2944	0,3100	0,3258
	1,50	0,1829	0,1993	0,2150	0,2305	0,2459	0,2613	0,2766	0,2921	0,3078	0,3236
0,15	1,00	0,2424	0,2573	0,2722	0,2872	0,3023	0,3176	0,3330	0,3486	0,3644	0,3804
	1,05	0,2351	0,2503	0,2655	0,2806	0,2959	0,3112	0,3267	0,3424	0,3583	0,3744
	1,10	0,2281	0,2436	0,2590	0,2744	0,2898	0,3053	0,3209	0,3366	0,3526	0,3687
	1,15	0,2210	0,2370	0,2528	0,2684	0,2840	0,2996	0,3153	0,3312	0,3472	0,3635
	1,20	0,2140	0,2306	0,2467	0,2626	0,2784	0,2942	0,3101	0,3261	0,3422	0,3585
	1,25	0,2067	0,2242	0,2408	0,2570	0,2731	0,2891	0,3051	0,3212	0,3374	0,3538
	1,30	0,1991	0,2177	0,2350	0,2516	0,2680	0,2842	0,3004	0,3166	0,3329	0,3494
	1,35	0,1905	0,2110	0,2292	0,2463	0,2630	0,2795	0,2958	0,3122	0,3286	0,3452
	1,40	0,1794	0,2040	0,2233	0,2411	0,2582	0,2749	0,2915	0,3080	0,3245	0,3412
	1,45		0,1961	0,2173	0,2359	0,2535	0,2705	0,2873	0,3039	0,3206	0,3374
	1,50		0,1863	0,2110	0,2307	0,2488	0,2662	0,2832	0,3001	0,3169	0,3338
0,2	1,00	0,2702	0,2852	0,3003	0,3154	0,3307	0,3462	0,3618	0,3776	0,3937	0,4100
	1,05	0,2610	0,2763	0,2916	0,3070	0,3225	0,3381	0,3538	0,3697	0,3859	0,4023
	1,10	0,2518	0,2675	0,2832	0,2988	0,3145	0,3303	0,3462	0,3622	0,3785	0,3950
	1,15	0,2424	0,2588	0,2749	0,2909	0,3068	0,3228	0,3389	0,3551	0,3714	0,3881
	1,20	0,2326	0,2499	0,2666	0,2830	0,2993	0,3155	0,3318	0,3482	0,3647	0,3815
	1,25	0,2217	0,2406	0,2582	0,2752	0,2919	0,3085	0,3250	0,3416	0,3583	0,3752
	1,30	0,2082	0,2305	0,2495	0,2674	0,2846	0,3016	0,3184	0,3352	0,3521	0,3691
	1,35	0,1777	0,2185	0,2403	0,2594	0,2773	0,2948	0,3120	0,3291	0,3461	0,3633
	1,40	0,1668	0,1977	0,2299	0,2510	0,2700	0,2880	0,3057	0,3231	0,3404	0,3578
	1,45		0,1642	0,2162	0,2418	0,2624	0,2813	0,2994	0,3172	0,3348	0,3524
	1,50			0,1606	0,2312	0,2544	0,2744	0,2932	0,3114	0,3293	0,3472
0,25	1,00	0,3002	0,3151	0,3302	0,3453	0,3606	0,3761	0,3918	0,4076	0,4238	0,4404
	1,05	0,2900	0,3052	0,3204	0,3357	0,3512	0,3668	0,3826	0,3985	0,4148	0,4314
	1,10	0,2798	0,2953	0,3108	0,3263	0,3420	0,3578	0,3737	0,3898	0,4062	0,4229
	1,15	0,2693	0,2853	0,3012	0,3171	0,3330	0,3490	0,3651	0,3814	0,3979	0,4147
	1,20	0,2583	0,2751	0,2915	0,3078	0,3241	0,3404	0,3567	0,3732	0,3899	0,4068
	1,25	0,2461	0,2643	0,2816	0,2985	0,3152	0,3319	0,3485	0,3652	0,3821	0,3992
	1,30	0,2311	0,2523	0,2711	0,2890	0,3063	0,3234	0,3404	0,3574	0,3745	0,3918
	1,35	0,2162	0,2376	0,2596	0,2790	0,2972	0,3150	0,3324	0,3498	0,3672	0,3847
	1,40	0,2098	0,2171	0,2456	0,2680	0,2877	0,3063	0,3244	0,3422	0,3599	0,3777
	1,45	0,2010	0,2102	0,2181	0,2551	0,2775	0,2974	0,3163	0,3347	0,3528	0,3709
	1,50		0,1991	0,2106	0,2338	0,2658	0,2879	0,3080	0,3271	0,3457	0,3642
0,3	1,00	0,3299	0,3448	0,3598	0,3749	0,3901	0,4056	0,4212	0,4370	0,4533	0,4701
	1,05	0,3194	0,3344	0,3495	0,3647	0,3801	0,3956	0,4113	0,4273	0,4436	0,4604
	1,10	0,3089	0,3241	0,3393	0,3547	0,3702	0,3859	0,4018	0,4178	0,4342	0,4510
	1,15	0,2981	0,3136	0,3292	0,3448	0,3605	0,3764	0,3924	0,4086	0,4251	0,4420
	1,20	0,2870	0,3030	0,3190	0,3349	0,3509	0,3670	0,3832	0,3996	0,4163	0,4333
	1,25	0,2751	0,2919	0,3085	0,3249	0,3413	0,3577	0,3741	0,3908	0,4076	0,4248
	1,30	0,2616	0,2800	0,2975	0,3146	0,3315	0,3483	0,3651	0,3820	0,3991	0,4164
	1,35	0,2519	0,2662	0,2856	0,3038	0,3215	0,3388	0,3561	0,3734	0,3907	0,4083
	1,40	0,2463	0,2531	0,2716	0,2920	0,3109	0,3291	0,3470	0,3647	0,3824	0,4003
	1,45	0,2402	0,2473	0,2542	0,2782	0,2995	0,3189	0,3377	0,3560	0,3741	0,3923
	1,50	0,2328	0,2407	0,2482	0,2578	0,2861	0,3079	0,3279	0,3470	0,3658	0,3844

μ_{lu} pour S 500 A ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 12

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2246	0,2378	0,2512	0,2648	0,2786	0,2927	0,3070	0,3216	0,3365	0,3517
0,05	1,00	0,2328	0,2469	0,2612	0,2757	0,2904	0,3053	0,3204	0,3358	0,3514	0,3673
	1,05	0,2312	0,2454	0,2597	0,2742	0,2889	0,3038	0,3189	0,3343	0,3499	0,3658
	1,10	0,2298	0,2440	0,2583	0,2728	0,2875	0,3024	0,3175	0,3329	0,3485	0,3644
	1,15	0,2285	0,2427	0,2570	0,2715	0,2862	0,3011	0,3163	0,3316	0,3472	0,3631
	1,20	0,2273	0,2415	0,2558	0,2703	0,2850	0,3000	0,3151	0,3304	0,3461	0,3620
	1,25	0,2262	0,2404	0,2547	0,2692	0,2840	0,2989	0,3140	0,3294	0,3450	0,3609
	1,30	0,2251	0,2393	0,2537	0,2682	0,2830	0,2979	0,3130	0,3284	0,3440	0,3599
	1,35	0,2242	0,2384	0,2528	0,2673	0,2820	0,2969	0,3121	0,3274	0,3430	0,3590
	1,40	0,2233	0,2375	0,2519	0,2664	0,2811	0,2961	0,3112	0,3266	0,3422	0,3581
	1,45	0,2224	0,2367	0,2510	0,2656	0,2803	0,2953	0,3104	0,3258	0,3414	0,3573
	1,50	0,2217	0,2359	0,2503	0,2648	0,2796	0,2945	0,3096	0,3250	0,3406	0,3565
0,1	1,00	0,2446	0,2598	0,2750	0,2903	0,3058	0,3214	0,3372	0,3532	0,3694	0,3859
	1,05	0,2410	0,2562	0,2715	0,2869	0,3024	0,3181	0,3339	0,3499	0,3662	0,3827
	1,10	0,2376	0,2529	0,2683	0,2838	0,2993	0,3150	0,3309	0,3469	0,3632	0,3798
	1,15	0,2344	0,2499	0,2653	0,2808	0,2964	0,3122	0,3281	0,3442	0,3605	0,3771
	1,20	0,2314	0,2470	0,2625	0,2781	0,2938	0,3096	0,3255	0,3416	0,3580	0,3746
	1,25	0,2286	0,2443	0,2599	0,2756	0,2913	0,3071	0,3231	0,3392	0,3556	0,3722
	1,30	0,2260	0,2417	0,2574	0,2732	0,2889	0,3048	0,3208	0,3370	0,3534	0,3701
	1,35	0,2235	0,2393	0,2551	0,2709	0,2867	0,3027	0,3187	0,3349	0,3514	0,3680
	1,40	0,2211	0,2371	0,2529	0,2688	0,2847	0,3006	0,3167	0,3330	0,3494	0,3661
	1,45	0,2188	0,2349	0,2509	0,2668	0,2827	0,2987	0,3149	0,3311	0,3476	0,3643
	1,50	0,2166	0,2329	0,2489	0,2649	0,2809	0,2970	0,3131	0,3294	0,3459	0,3627
0,15	1,00	0,2614	0,2773	0,2931	0,3090	0,3250	0,3411	0,3573	0,3737	0,3904	0,4074
	1,05	0,2554	0,2715	0,2875	0,3036	0,3197	0,3359	0,3522	0,3687	0,3855	0,4025
	1,10	0,2495	0,2659	0,2822	0,2984	0,3147	0,3310	0,3475	0,3641	0,3809	0,3980
	1,15	0,2439	0,2606	0,2772	0,2936	0,3100	0,3264	0,3430	0,3597	0,3766	0,3937
	1,20	0,2384	0,2555	0,2723	0,2890	0,3056	0,3221	0,3388	0,3556	0,3726	0,3898
	1,25	0,2329	0,2506	0,2677	0,2846	0,3013	0,3181	0,3348	0,3517	0,3688	0,3861
	1,30	0,2275	0,2457	0,2632	0,2804	0,2973	0,3142	0,3311	0,3481	0,3652	0,3826
	1,35	0,2221	0,2410	0,2589	0,2763	0,2935	0,3105	0,3276	0,3447	0,3619	0,3793
	1,40	0,2165	0,2363	0,2547	0,2725	0,2898	0,3071	0,3242	0,3414	0,3587	0,3762
	1,45	0,2106	0,2316	0,2506	0,2687	0,2863	0,3037	0,3210	0,3383	0,3557	0,3733
	1,50	0,2042	0,2269	0,2466	0,2651	0,2829	0,3005	0,3180	0,3354	0,3528	0,3705
0,2	1,00	0,2832	0,2992	0,3153	0,3314	0,3475	0,3638	0,3802	0,3968	0,4137	0,4310
	1,05	0,2750	0,2914	0,3078	0,3241	0,3405	0,3569	0,3735	0,3902	0,4072	0,4246
	1,10	0,2669	0,2838	0,3005	0,3171	0,3337	0,3504	0,3671	0,3840	0,4011	0,4186
	1,15	0,2587	0,2762	0,2934	0,3104	0,3273	0,3441	0,3611	0,3781	0,3954	0,4129
	1,20	0,2502	0,2687	0,2864	0,3038	0,3210	0,3382	0,3553	0,3725	0,3899	0,4076
	1,25	0,2412	0,2610	0,2795	0,2974	0,3150	0,3324	0,3498	0,3672	0,3847	0,4025
	1,30	0,2311	0,2530	0,2725	0,2911	0,3091	0,3268	0,3444	0,3620	0,3798	0,3977
	1,35	0,2176	0,2444	0,2654	0,2848	0,3033	0,3214	0,3393	0,3571	0,3750	0,3931
	1,40		0,2344	0,2580	0,2785	0,2976	0,3161	0,3343	0,3524	0,3705	0,3887
	1,45		0,2205	0,2500	0,2720	0,2920	0,3110	0,3295	0,3478	0,3661	0,3845
	1,50			0,2409	0,2653	0,2863	0,3059	0,3248	0,3434	0,3619	0,3804
0,25	1,00	0,3083	0,3242	0,3401	0,3561	0,3722	0,3884	0,4047	0,4214	0,4383	0,4557
	1,05	0,2988	0,3151	0,3313	0,3475	0,3638	0,3802	0,3968	0,4136	0,4307	0,4482
	1,10	0,2892	0,3060	0,3226	0,3392	0,3558	0,3724	0,3892	0,4061	0,4234	0,4410
	1,15	0,2793	0,2968	0,3140	0,3310	0,3479	0,3648	0,3818	0,3990	0,4164	0,4341
	1,20	0,2688	0,2874	0,3053	0,3228	0,3402	0,3574	0,3747	0,3921	0,4097	0,4276
	1,25	0,2569	0,2774	0,2964	0,3146	0,3325	0,3502	0,3678	0,3854	0,4032	0,4213
	1,30	0,2414	0,2664	0,2871	0,3063	0,3249	0,3430	0,3610	0,3789	0,3970	0,4152
	1,35	0,2154	0,2528	0,2770	0,2978	0,3172	0,3359	0,3543	0,3726	0,3909	0,4094
	1,40	0,2033	0,2164	0,2652	0,2886	0,3093	0,3288	0,3478	0,3664	0,3851	0,4038
	1,45		0,2003	0,2480	0,2785	0,3011	0,3217	0,3412	0,3604	0,3793	0,3983
	1,50			0,1955	0,2660	0,2923	0,3143	0,3347	0,3544	0,3737	0,3930
0,3	1,00	0,3346	0,3502	0,3658	0,3816	0,3974	0,4134	0,4296	0,4461	0,4630	0,4803
	1,05	0,3246	0,3404	0,3563	0,3723	0,3884	0,4046	0,4209	0,4376	0,4546	0,4723
	1,10	0,3144	0,3306	0,3469	0,3631	0,3795	0,3959	0,4125	0,4293	0,4465	0,4643
	1,15	0,3038	0,3207	0,3374	0,3540	0,3707	0,3874	0,4043	0,4213	0,4387	0,4565
	1,20	0,2926	0,3104	0,3278	0,3449	0,3620	0,3791	0,3962	0,4135	0,4311	0,4491
	1,25	0,2801	0,2994	0,3178	0,3357	0,3533	0,3708	0,3883	0,4059	0,4237	0,4418
	1,30	0,2645	0,2872	0,3072	0,3261	0,3444	0,3625	0,3804	0,3983	0,4164	0,4348
	1,35	0,2514	0,2718	0,2954	0,3160	0,3354	0,3541	0,3726	0,3909	0,4093	0,4279
	1,40	0,2443	0,2527	0,2809	0,3049	0,3258	0,3456	0,3647	0,3835	0,4023	0,4212
	1,45	0,2337	0,2450	0,2540	0,2916	0,3155	0,3367	0,3567	0,3761	0,3954	0,4147
	1,50		0,2299	0,2457	0,2697	0,3036	0,3272	0,3485	0,3687	0,3885	0,4082

μ_{lu} pour S 500 A ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 15

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2479	0,2618	0,2760	0,2903	0,3049	0,3197	0,3348	0,3501	0,3658	0,3817
0,05	1,00	0,2546	0,2694	0,2843	0,2995	0,3148	0,3303	0,3460	0,3619	0,3782	0,3948
	1,05	0,2533	0,2681	0,2831	0,2982	0,3135	0,3290	0,3447	0,3607	0,3769	0,3935
	1,10	0,2521	0,2669	0,2819	0,2970	0,3123	0,3278	0,3436	0,3595	0,3758	0,3924
	1,15	0,2510	0,2658	0,2808	0,2959	0,3113	0,3268	0,3425	0,3585	0,3747	0,3913
	1,20	0,2500	0,2649	0,2798	0,2950	0,3103	0,3258	0,3415	0,3575	0,3738	0,3904
	1,25	0,2491	0,2639	0,2789	0,2941	0,3094	0,3249	0,3406	0,3566	0,3729	0,3895
	1,30	0,2483	0,2631	0,2781	0,2932	0,3085	0,3241	0,3398	0,3558	0,3721	0,3887
	1,35	0,2475	0,2623	0,2773	0,2924	0,3078	0,3233	0,3390	0,3550	0,3713	0,3879
	1,40	0,2467	0,2615	0,2765	0,2917	0,3070	0,3226	0,3383	0,3543	0,3706	0,3872
	1,45	0,2460	0,2609	0,2759	0,2910	0,3064	0,3219	0,3377	0,3537	0,3699	0,3865
	1,50	0,2454	0,2602	0,2752	0,2904	0,3057	0,3213	0,3370	0,3530	0,3693	0,3859
0,1	1,00	0,2641	0,2797	0,2955	0,3113	0,3273	0,3434	0,3597	0,3762	0,3929	0,4101
	1,05	0,2611	0,2768	0,2926	0,3085	0,3245	0,3406	0,3569	0,3735	0,3903	0,4074
	1,10	0,2583	0,2741	0,2899	0,3059	0,3219	0,3381	0,3545	0,3710	0,3879	0,4050
	1,15	0,2556	0,2715	0,2874	0,3034	0,3195	0,3358	0,3522	0,3688	0,3856	0,4028
	1,20	0,2532	0,2692	0,2851	0,3012	0,3173	0,3336	0,3500	0,3667	0,3835	0,4007
	1,25	0,2509	0,2670	0,2830	0,2991	0,3153	0,3316	0,3480	0,3647	0,3816	0,3988
	1,30	0,2488	0,2649	0,2810	0,2971	0,3134	0,3297	0,3462	0,3629	0,3798	0,3971
	1,35	0,2468	0,2630	0,2791	0,2953	0,3116	0,3280	0,3445	0,3612	0,3781	0,3954
	1,40	0,2449	0,2612	0,2774	0,2936	0,3099	0,3263	0,3429	0,3596	0,3766	0,3939
	1,45	0,2431	0,2594	0,2757	0,2920	0,3083	0,3248	0,3414	0,3581	0,3751	0,3924
	1,50	0,2414	0,2578	0,2741	0,2905	0,3069	0,3233	0,3399	0,3567	0,3737	0,3910
0,15	1,00	0,2773	0,2936	0,3100	0,3263	0,3428	0,3593	0,3760	0,3929	0,4101	0,4276
	1,05	0,2722	0,2887	0,3052	0,3218	0,3383	0,3550	0,3718	0,3887	0,4060	0,4236
	1,10	0,2673	0,2841	0,3008	0,3175	0,3342	0,3509	0,3678	0,3849	0,4022	0,4198
	1,15	0,2627	0,2797	0,2966	0,3135	0,3303	0,3471	0,3641	0,3813	0,3987	0,4164
	1,20	0,2582	0,2756	0,2927	0,3097	0,3266	0,3436	0,3607	0,3779	0,3954	0,4131
	1,25	0,2539	0,2716	0,2889	0,3061	0,3232	0,3403	0,3574	0,3747	0,3923	0,4101
	1,30	0,2497	0,2677	0,2853	0,3027	0,3199	0,3371	0,3544	0,3718	0,3894	0,4072
	1,35	0,2457	0,2641	0,2819	0,2994	0,3168	0,3342	0,3515	0,3690	0,3866	0,4046
	1,40	0,2417	0,2605	0,2786	0,2964	0,3139	0,3313	0,3488	0,3664	0,3841	0,4021
	1,45	0,2377	0,2571	0,2755	0,2934	0,3111	0,3287	0,3462	0,3639	0,3816	0,3997
	1,50	0,2338	0,2537	0,2724	0,2906	0,3084	0,3261	0,3438	0,3615	0,3794	0,3974
0,2	1,00	0,2947	0,3114	0,3280	0,3445	0,3612	0,3779	0,3948	0,4119	0,4292	0,4471
	1,05	0,2875	0,3046	0,3215	0,3383	0,3551	0,3721	0,3891	0,4063	0,4238	0,4417
	1,10	0,2805	0,2980	0,3152	0,3323	0,3494	0,3665	0,3837	0,4011	0,4187	0,4367
	1,15	0,2735	0,2915	0,3092	0,3266	0,3439	0,3613	0,3786	0,3961	0,4139	0,4320
	1,20	0,2664	0,2852	0,3033	0,3211	0,3387	0,3563	0,3738	0,3915	0,4093	0,4276
	1,25	0,2592	0,2789	0,2976	0,3158	0,3337	0,3515	0,3692	0,3870	0,4051	0,4234
	1,30	0,2515	0,2725	0,2919	0,3106	0,3288	0,3469	0,3648	0,3828	0,4010	0,4194
	1,35	0,2431	0,2660	0,2863	0,3055	0,3242	0,3425	0,3607	0,3788	0,3971	0,4156
	1,40	0,2330	0,2593	0,2807	0,3006	0,3196	0,3382	0,3566	0,3750	0,3934	0,4121
	1,45		0,2520	0,2751	0,2957	0,3152	0,3341	0,3528	0,3713	0,3899	0,4087
	1,50		0,2436	0,2692	0,2908	0,3109	0,3302	0,3491	0,3678	0,3865	0,4054
0,25	1,00	0,3158	0,3323	0,3488	0,3653	0,3818	0,3985	0,4153	0,4324	0,4498	0,4679
	1,05	0,3071	0,3241	0,3409	0,3577	0,3745	0,3914	0,4084	0,4257	0,4432	0,4614
	1,10	0,2983	0,3159	0,3332	0,3503	0,3675	0,3846	0,4019	0,4193	0,4370	0,4553
	1,15	0,2893	0,3076	0,3255	0,3431	0,3606	0,3780	0,3955	0,4132	0,4311	0,4494
	1,20	0,2797	0,2992	0,3179	0,3360	0,3539	0,3717	0,3895	0,4073	0,4254	0,4439
	1,25	0,2691	0,2905	0,3101	0,3290	0,3474	0,3655	0,3836	0,4017	0,4200	0,4386
	1,30	0,2561	0,2811	0,3022	0,3219	0,3409	0,3595	0,3779	0,3963	0,4148	0,4336
	1,35	0,2138	0,2702	0,2939	0,3148	0,3345	0,3536	0,3723	0,3910	0,4098	0,4287
	1,40		0,2554	0,2848	0,3074	0,3280	0,3477	0,3669	0,3859	0,4049	0,4241
	1,45			0,2741	0,2997	0,3215	0,3419	0,3616	0,3810	0,4002	0,4196
	1,50			0,2583	0,2912	0,3148	0,3361	0,3564	0,3761	0,3957	0,4153
0,3	1,00	0,3390	0,3551	0,3712	0,3874	0,4037	0,4201	0,4366	0,4535	0,4708	0,4839
	1,05	0,3295	0,3460	0,3625	0,3790	0,3955	0,4121	0,4290	0,4460	0,4635	0,4808
	1,10	0,3198	0,3369	0,3538	0,3707	0,3875	0,4045	0,4215	0,4388	0,4565	0,4750
	1,15	0,3097	0,3276	0,3451	0,3624	0,3797	0,3969	0,4143	0,4318	0,4497	0,4682
	1,20	0,2988	0,3179	0,3362	0,3542	0,3719	0,3895	0,4072	0,4250	0,4431	0,4618
	1,25	0,2864	0,3075	0,3271	0,3458	0,3641	0,3822	0,4003	0,4184	0,4368	0,4556
	1,30	0,2695	0,2958	0,3173	0,3372	0,3563	0,3750	0,3935	0,4120	0,4306	0,4496
	1,35	0,2506	0,2808	0,3066	0,3282	0,3484	0,3677	0,3867	0,4056	0,4246	0,4438
	1,40	0,2396	0,2521	0,2936	0,3185	0,3401	0,3604	0,3800	0,3994	0,4187	0,4382
	1,45		0,2382	0,2538	0,3073	0,3314	0,3529	0,3733	0,3932	0,4129	0,4327
	1,50			0,2359	0,2924	0,3218	0,3451	0,3665	0,3870	0,4072	0,4273

μ_{lu} pour S 500 A ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 18

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2660	0,2805	0,2951	0,3100	0,3251	0,3404	0,3559	0,3717	0,3878	0,4043
0,05	1,00	0,2717	0,2869	0,3023	0,3178	0,3335	0,3493	0,3654	0,3818	0,3984	0,4154
	1,05	0,2706	0,2858	0,3012	0,3167	0,3324	0,3483	0,3644	0,3807	0,3974	0,4144
	1,10	0,2696	0,2848	0,3002	0,3157	0,3314	0,3473	0,3634	0,3797	0,3964	0,4134
	1,15	0,2687	0,2839	0,2993	0,3148	0,3305	0,3464	0,3625	0,3788	0,3955	0,4125
	1,20	0,2678	0,2830	0,2984	0,3139	0,3297	0,3456	0,3617	0,3780	0,3947	0,4117
	1,25	0,2670	0,2823	0,2976	0,3132	0,3289	0,3448	0,3609	0,3773	0,3939	0,4110
	1,30	0,2663	0,2815	0,2969	0,3125	0,3282	0,3441	0,3602	0,3766	0,3933	0,4103
	1,35	0,2656	0,2809	0,2962	0,3118	0,3275	0,3434	0,3596	0,3759	0,3926	0,4096
	1,40	0,2650	0,2802	0,2956	0,3112	0,3269	0,3428	0,3589	0,3753	0,3920	0,4090
	1,45	0,2644	0,2796	0,2950	0,3106	0,3263	0,3422	0,3584	0,3748	0,3914	0,4085
	1,50	0,2638	0,2791	0,2945	0,3101	0,3258	0,3417	0,3579	0,3742	0,3909	0,4080
0,1	1,00	0,2796	0,2955	0,3116	0,3277	0,3440	0,3604	0,3770	0,3938	0,4109	0,4284
	1,05	0,2770	0,2930	0,3091	0,3253	0,3416	0,3580	0,3747	0,3915	0,4087	0,4262
	1,10	0,2746	0,2907	0,3069	0,3231	0,3394	0,3559	0,3726	0,3894	0,4066	0,4242
	1,15	0,2724	0,2886	0,3048	0,3210	0,3374	0,3539	0,3706	0,3875	0,4047	0,4223
	1,20	0,2704	0,2866	0,3028	0,3191	0,3355	0,3521	0,3688	0,3858	0,4030	0,4206
	1,25	0,2685	0,2847	0,3010	0,3174	0,3338	0,3504	0,3671	0,3841	0,4013	0,4190
	1,30	0,2667	0,2830	0,2993	0,3157	0,3322	0,3488	0,3656	0,3826	0,3998	0,4175
	1,35	0,2650	0,2814	0,2978	0,3142	0,3307	0,3473	0,3642	0,3812	0,3984	0,4161
	1,40	0,2634	0,2799	0,2963	0,3128	0,3293	0,3460	0,3628	0,3798	0,3971	0,4148
	1,45	0,2619	0,2784	0,2949	0,3114	0,3280	0,3447	0,3615	0,3786	0,3959	0,4136
	1,50	0,2605	0,2771	0,2936	0,3101	0,3267	0,3435	0,3603	0,3774	0,3947	0,4124
0,15	1,00	0,2903	0,3070	0,3236	0,3402	0,3569	0,3737	0,3907	0,4078	0,4253	0,4432
	1,05	0,2860	0,3028	0,3195	0,3363	0,3531	0,3700	0,3870	0,4043	0,4218	0,4398
	1,10	0,2818	0,2988	0,3158	0,3326	0,3496	0,3666	0,3837	0,4010	0,4186	0,4366
	1,15	0,2779	0,2951	0,3122	0,3292	0,3463	0,3634	0,3806	0,3980	0,4156	0,4337
	1,20	0,2742	0,2916	0,3089	0,3260	0,3432	0,3604	0,3777	0,3951	0,4129	0,4310
	1,25	0,2707	0,2883	0,3057	0,3230	0,3403	0,3576	0,3749	0,3925	0,4103	0,4284
	1,30	0,2673	0,2852	0,3028	0,3202	0,3376	0,3549	0,3724	0,3900	0,4078	0,4260
	1,35	0,2640	0,2822	0,2999	0,3175	0,3350	0,3525	0,3700	0,3877	0,4056	0,4238
	1,40	0,2609	0,2793	0,2972	0,3150	0,3325	0,3501	0,3677	0,3855	0,4034	0,4217
	1,45	0,2579	0,2765	0,2947	0,3125	0,3302	0,3479	0,3656	0,3834	0,4014	0,4197
	1,50	0,2549	0,2739	0,2922	0,3102	0,3281	0,3458	0,3636	0,3814	0,3995	0,4179
0,2	1,00	0,3047	0,3217	0,3386	0,3554	0,3723	0,3893	0,4065	0,4238	0,4415	0,4597
	1,05	0,2984	0,3157	0,3329	0,3500	0,3671	0,3843	0,4016	0,4190	0,4368	0,4551
	1,10	0,2922	0,3100	0,3275	0,3449	0,3622	0,3795	0,3970	0,4146	0,4325	0,4509
	1,15	0,2862	0,3045	0,3223	0,3399	0,3575	0,3750	0,3926	0,4104	0,4284	0,4469
	1,20	0,2803	0,2991	0,3173	0,3353	0,3530	0,3708	0,3885	0,4064	0,4245	0,4431
	1,25	0,2743	0,2938	0,3125	0,3308	0,3488	0,3667	0,3846	0,4027	0,4209	0,4395
	1,30	0,2683	0,2886	0,3078	0,3264	0,3447	0,3629	0,3809	0,3991	0,4175	0,4362
	1,35	0,2621	0,2835	0,3032	0,3222	0,3408	0,3592	0,3774	0,3958	0,4142	0,4331
	1,40	0,2556	0,2783	0,2988	0,3182	0,3371	0,3557	0,3741	0,3926	0,4112	0,4301
	1,45	0,2484	0,2731	0,2944	0,3143	0,3335	0,3523	0,3709	0,3895	0,4082	0,4272
	1,50	0,2397	0,2677	0,2900	0,3104	0,3300	0,3490	0,3679	0,3866	0,4055	0,4245
0,25	1,00	0,3226	0,3395	0,3563	0,3731	0,3900	0,4069	0,4240	0,4413	0,4590	0,4776
	1,05	0,3147	0,3320	0,3493	0,3664	0,3835	0,4007	0,4179	0,4354	0,4533	0,4720
	1,10	0,3067	0,3247	0,3424	0,3599	0,3773	0,3947	0,4122	0,4299	0,4479	0,4666
	1,15	0,2986	0,3174	0,3356	0,3535	0,3713	0,3890	0,4067	0,4246	0,4428	0,4616
	1,20	0,2902	0,3100	0,3289	0,3473	0,3655	0,3835	0,4015	0,4196	0,4380	0,4569
	1,25	0,2811	0,3024	0,3222	0,3412	0,3598	0,3782	0,3964	0,4148	0,4333	0,4524
	1,30	0,2706	0,2945	0,3155	0,3352	0,3543	0,3730	0,3916	0,4102	0,4289	0,4481
	1,35	0,2563	0,2860	0,3086	0,3292	0,3489	0,3680	0,3869	0,4057	0,4247	0,4440
	1,40		0,2760	0,3014	0,3232	0,3435	0,3631	0,3824	0,4015	0,4206	0,4401
	1,45		0,2621	0,2937	0,3171	0,3382	0,3584	0,3780	0,3973	0,4167	0,4363
	1,50			0,2850	0,3107	0,3329	0,3537	0,3737	0,3933	0,4129	0,4327
0,3	1,00	0,3431	0,3595	0,3760	0,3925	0,4090	0,4256	0,4425	0,4596	0,4773	0,4868
	1,05	0,3341	0,3511	0,3680	0,3848	0,4017	0,4186	0,4356	0,4530	0,4708	0,4840
	1,10	0,3250	0,3427	0,3600	0,3773	0,3945	0,4117	0,4290	0,4466	0,4646	0,4815
	1,15	0,3155	0,3340	0,3521	0,3698	0,3874	0,4050	0,4227	0,4405	0,4587	0,4778
	1,20	0,3053	0,3251	0,3440	0,3624	0,3805	0,3985	0,4164	0,4345	0,4530	0,4722
	1,25	0,2935	0,3156	0,3358	0,3549	0,3736	0,3921	0,4104	0,4288	0,4475	0,4668
	1,30	0,2774	0,3050	0,3271	0,3474	0,3668	0,3857	0,4045	0,4232	0,4421	0,4616
	1,35	0,2494	0,2918	0,3177	0,3395	0,3598	0,3794	0,3987	0,4178	0,4370	0,4566
	1,40		0,2511	0,3068	0,3312	0,3528	0,3732	0,3929	0,4124	0,4319	0,4518
	1,45			0,2918	0,3221	0,3455	0,3668	0,3872	0,4072	0,4271	0,4472
	1,50				0,3114	0,3378	0,3604	0,3816	0,4020	0,4223	0,4427

μ_{lu} pour S 500 A ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 21

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2806	0,2954	0,3104	0,3255	0,3409	0,3565	0,3724	0,3885	0,4049	0,4218
0,05	1,00	0,2855	0,3010	0,3166	0,3323	0,3482	0,3643	0,3807	0,3973	0,4142	0,4315
	1,05	0,2845	0,3000	0,3156	0,3314	0,3473	0,3634	0,3797	0,3963	0,4133	0,4306
	1,10	0,2836	0,2991	0,3147	0,3305	0,3464	0,3626	0,3789	0,3955	0,4124	0,4298
	1,15	0,2828	0,2983	0,3139	0,3297	0,3456	0,3618	0,3781	0,3947	0,4117	0,4290
	1,20	0,2821	0,2976	0,3132	0,3290	0,3449	0,3611	0,3774	0,3940	0,4110	0,4283
	1,25	0,2814	0,2969	0,3125	0,3283	0,3443	0,3604	0,3768	0,3934	0,4103	0,4277
	1,30	0,2807	0,2962	0,3119	0,3277	0,3436	0,3598	0,3762	0,3928	0,4097	0,4271
	1,35	0,2801	0,2957	0,3113	0,3271	0,3431	0,3592	0,3756	0,3922	0,4092	0,4265
	1,40	0,2796	0,2951	0,3108	0,3266	0,3425	0,3587	0,3751	0,3917	0,4087	0,4260
	1,45	0,2791	0,2946	0,3103	0,3261	0,3420	0,3582	0,3746	0,3912	0,4082	0,4255
	1,50	0,2786	0,2941	0,3098	0,3256	0,3416	0,3577	0,3741	0,3908	0,4077	0,4251
0,1	1,00	0,2922	0,3083	0,3245	0,3408	0,3573	0,3738	0,3906	0,4076	0,4249	0,4428
	1,05	0,2899	0,3061	0,3224	0,3387	0,3552	0,3718	0,3886	0,4057	0,4230	0,4408
	1,10	0,2879	0,3041	0,3204	0,3368	0,3533	0,3700	0,3868	0,4039	0,4213	0,4391
	1,15	0,2860	0,3023	0,3186	0,3350	0,3516	0,3683	0,3851	0,4022	0,4196	0,4375
	1,20	0,2842	0,3005	0,3169	0,3334	0,3500	0,3667	0,3836	0,4007	0,4181	0,4360
	1,25	0,2825	0,2989	0,3154	0,3319	0,3485	0,3652	0,3822	0,3993	0,4167	0,4346
	1,30	0,2810	0,2975	0,3139	0,3305	0,3471	0,3639	0,3808	0,3980	0,4154	0,4333
	1,35	0,2796	0,2961	0,3126	0,3292	0,3458	0,3626	0,3796	0,3968	0,4142	0,4321
	1,40	0,2782	0,2948	0,3113	0,3279	0,3446	0,3614	0,3784	0,3956	0,4131	0,4310
	1,45	0,2770	0,2935	0,3101	0,3268	0,3435	0,3603	0,3773	0,3946	0,4121	0,4300
	1,50	0,2758	0,2924	0,3090	0,3257	0,3424	0,3593	0,3763	0,3936	0,4111	0,4290
0,15	1,00	0,3012	0,3180	0,3347	0,3515	0,3683	0,3853	0,4024	0,4197	0,4373	0,4556
	1,05	0,2974	0,3143	0,3312	0,3481	0,3650	0,3820	0,3992	0,4166	0,4343	0,4526
	1,10	0,2938	0,3109	0,3279	0,3449	0,3620	0,3791	0,3963	0,4138	0,4316	0,4499
	1,15	0,2904	0,3077	0,3249	0,3420	0,3591	0,3763	0,3936	0,4112	0,4290	0,4473
	1,20	0,2873	0,3047	0,3220	0,3392	0,3564	0,3737	0,3911	0,4087	0,4266	0,4450
	1,25	0,2843	0,3019	0,3193	0,3366	0,3540	0,3713	0,3888	0,4065	0,4244	0,4428
	1,30	0,2814	0,2992	0,3168	0,3342	0,3516	0,3691	0,3866	0,4043	0,4223	0,4408
	1,35	0,2787	0,2967	0,3144	0,3319	0,3494	0,3669	0,3846	0,4023	0,4204	0,4388
	1,40	0,2761	0,2942	0,3121	0,3298	0,3474	0,3650	0,3826	0,4005	0,4186	0,4371
	1,45	0,2736	0,2920	0,3099	0,3277	0,3454	0,3631	0,3808	0,3987	0,4168	0,4354
	1,50	0,2712	0,2898	0,3079	0,3258	0,3435	0,3613	0,3791	0,3970	0,4152	0,4338
0,2	1,00	0,3133	0,3304	0,3475	0,3645	0,3815	0,3987	0,4159	0,4334	0,4513	0,4699
	1,05	0,3077	0,3252	0,3425	0,3597	0,3770	0,3942	0,4116	0,4293	0,4472	0,4659
	1,10	0,3023	0,3201	0,3377	0,3552	0,3726	0,3901	0,4076	0,4254	0,4435	0,4622
	1,15	0,2971	0,3153	0,3332	0,3509	0,3686	0,3862	0,4039	0,4217	0,4399	0,4587
	1,20	0,2920	0,3107	0,3289	0,3469	0,3647	0,3825	0,4003	0,4183	0,4366	0,4554
	1,25	0,2870	0,3062	0,3248	0,3430	0,3611	0,3790	0,3970	0,4151	0,4335	0,4524
	1,30	0,2821	0,3019	0,3208	0,3393	0,3576	0,3757	0,3938	0,4121	0,4306	0,4495
	1,35	0,2771	0,2976	0,3170	0,3358	0,3543	0,3726	0,3908	0,4092	0,4278	0,4468
	1,40	0,2722	0,2934	0,3133	0,3324	0,3511	0,3696	0,3880	0,4065	0,4252	0,4443
	1,45	0,2671	0,2893	0,3096	0,3291	0,3480	0,3667	0,3853	0,4039	0,4227	0,4418
	1,50	0,2617	0,2852	0,3061	0,3259	0,3451	0,3640	0,3827	0,4014	0,4203	0,4396
0,25	1,00	0,3286	0,3458	0,3628	0,3798	0,3968	0,4139	0,4311	0,4486	0,4665	0,4823
	1,05	0,3214	0,3391	0,3565	0,3738	0,3911	0,4084	0,4258	0,4434	0,4615	0,4802
	1,10	0,3143	0,3325	0,3503	0,3680	0,3855	0,4031	0,4207	0,4386	0,4568	0,4759
	1,15	0,3070	0,3259	0,3443	0,3624	0,3802	0,3981	0,4159	0,4340	0,4523	0,4715
	1,20	0,2996	0,3195	0,3384	0,3569	0,3752	0,3933	0,4114	0,4296	0,4481	0,4673
	1,25	0,2919	0,3129	0,3326	0,3516	0,3702	0,3886	0,4070	0,4254	0,4441	0,4634
	1,30	0,2834	0,3062	0,3269	0,3464	0,3655	0,3842	0,4028	0,4214	0,4403	0,4597
	1,35	0,2735	0,2993	0,3211	0,3413	0,3608	0,3799	0,3988	0,4176	0,4367	0,4562
	1,40	0,2587	0,2918	0,3152	0,3363	0,3563	0,3757	0,3949	0,4140	0,4332	0,4528
	1,45		0,2832	0,3091	0,3312	0,3519	0,3717	0,3911	0,4105	0,4298	0,4496
	1,50		0,2722	0,3028	0,3262	0,3475	0,3678	0,3875	0,4071	0,4267	0,4466
0,3	1,00	0,3468	0,3636	0,3802	0,3969	0,4136	0,4304	0,4473	0,4646	0,4811	0,4891
	1,05	0,3384	0,3557	0,3729	0,3899	0,4069	0,4240	0,4412	0,4587	0,4768	0,4867
	1,10	0,3300	0,3479	0,3656	0,3831	0,4005	0,4179	0,4354	0,4531	0,4713	0,4844
	1,15	0,3211	0,3400	0,3584	0,3763	0,3941	0,4119	0,4297	0,4477	0,4661	0,4823
	1,20	0,3116	0,3319	0,3511	0,3697	0,3879	0,4061	0,4242	0,4424	0,4611	0,4803
	1,25	0,3009	0,3233	0,3436	0,3630	0,3818	0,4004	0,4189	0,4374	0,4562	0,4760
	1,30	0,2869	0,3139	0,3360	0,3563	0,3758	0,3948	0,4137	0,4325	0,4516	0,4714
	1,35	0,2470	0,3028	0,3278	0,3495	0,3698	0,3893	0,4086	0,4278	0,4471	0,4671
	1,40		0,2860	0,3188	0,3424	0,3637	0,3839	0,4036	0,4232	0,4428	0,4629
	1,45			0,3080	0,3349	0,3575	0,3785	0,3988	0,4187	0,4386	0,4589
	1,50			0,2901	0,3267	0,3512	0,3731	0,3940	0,4143	0,4345	0,4550

μ_{lu} pour S 500 A ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 24

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2924	0,3075	0,3227	0,3381	0,3537	0,3695	0,3856	0,4019	0,4186	0,4357
0,05	1,00	0,2968	0,3124	0,3282	0,3441	0,3602	0,3764	0,3929	0,4096	0,4267	0,4443
	1,05	0,2959	0,3115	0,3273	0,3432	0,3593	0,3756	0,3921	0,4088	0,4259	0,4435
	1,10	0,2951	0,3108	0,3265	0,3425	0,3586	0,3748	0,3913	0,4081	0,4252	0,4428
	1,15	0,2944	0,3100	0,3258	0,3418	0,3579	0,3742	0,3907	0,4074	0,4245	0,4421
	1,20	0,2937	0,3094	0,3252	0,3411	0,3572	0,3735	0,3900	0,4068	0,4239	0,4415
	1,25	0,2931	0,3088	0,3246	0,3405	0,3567	0,3730	0,3895	0,4062	0,4234	0,4410
	1,30	0,2925	0,3082	0,3240	0,3400	0,3561	0,3724	0,3889	0,4057	0,4228	0,4404
	1,35	0,2920	0,3077	0,3235	0,3395	0,3556	0,3719	0,3884	0,4052	0,4224	0,4399
	1,40	0,2915	0,3072	0,3230	0,3390	0,3551	0,3715	0,3880	0,4048	0,4219	0,4395
	1,45	0,2911	0,3068	0,3226	0,3386	0,3547	0,3710	0,3876	0,4044	0,4215	0,4391
	1,50	0,2906	0,3064	0,3222	0,3382	0,3543	0,3706	0,3872	0,4040	0,4211	0,4387
0,1	1,00	0,3025	0,3188	0,3351	0,3515	0,3681	0,3847	0,4016	0,4187	0,4362	0,4542
	1,05	0,3006	0,3169	0,3332	0,3497	0,3663	0,3830	0,3999	0,4170	0,4345	0,4526
	1,10	0,2987	0,3151	0,3315	0,3480	0,3646	0,3813	0,3983	0,4154	0,4330	0,4510
	1,15	0,2971	0,3135	0,3299	0,3464	0,3631	0,3798	0,3968	0,4140	0,4316	0,4496
	1,20	0,2955	0,3120	0,3284	0,3450	0,3617	0,3785	0,3955	0,4127	0,4302	0,4483
	1,25	0,2941	0,3106	0,3271	0,3437	0,3604	0,3772	0,3942	0,4114	0,4290	0,4471
	1,30	0,2927	0,3093	0,3258	0,3424	0,3592	0,3760	0,3930	0,4103	0,4279	0,4460
	1,35	0,2915	0,3080	0,3246	0,3413	0,3580	0,3749	0,3920	0,4092	0,4269	0,4450
	1,40	0,2903	0,3069	0,3235	0,3402	0,3570	0,3739	0,3909	0,4082	0,4259	0,4440
	1,45	0,2892	0,3058	0,3225	0,3392	0,3560	0,3729	0,3900	0,4073	0,4250	0,4431
	1,50	0,2882	0,3048	0,3215	0,3382	0,3551	0,3720	0,3891	0,4064	0,4241	0,4422
0,15	1,00	0,3103	0,3271	0,3439	0,3608	0,3777	0,3947	0,4119	0,4293	0,4471	0,4655
	1,05	0,3069	0,3239	0,3408	0,3578	0,3748	0,3919	0,4091	0,4266	0,4444	0,4629
	1,10	0,3038	0,3209	0,3380	0,3550	0,3721	0,3893	0,4066	0,4241	0,4420	0,4605
	1,15	0,3008	0,3181	0,3353	0,3524	0,3696	0,3868	0,4042	0,4218	0,4398	0,4583
	1,20	0,2981	0,3155	0,3328	0,3500	0,3673	0,3846	0,4020	0,4197	0,4377	0,4562
	1,25	0,2955	0,3130	0,3304	0,3477	0,3651	0,3825	0,4000	0,4177	0,4357	0,4543
	1,30	0,2930	0,3107	0,3282	0,3456	0,3630	0,3805	0,3981	0,4159	0,4339	0,4525
	1,35	0,2907	0,3085	0,3261	0,3436	0,3611	0,3787	0,3963	0,4141	0,4322	0,4509
	1,40	0,2885	0,3064	0,3242	0,3418	0,3593	0,3769	0,3946	0,4125	0,4307	0,4493
	1,45	0,2864	0,3045	0,3223	0,3400	0,3576	0,3753	0,3930	0,4110	0,4292	0,4479
	1,50	0,2843	0,3026	0,3205	0,3383	0,3560	0,3738	0,3916	0,4095	0,4278	0,4465
0,2	1,00	0,3206	0,3379	0,3550	0,3721	0,3892	0,4064	0,4237	0,4413	0,4593	0,4782
	1,05	0,3157	0,3332	0,3506	0,3679	0,3851	0,4025	0,4199	0,4376	0,4557	0,4746
	1,10	0,3109	0,3288	0,3464	0,3639	0,3813	0,3988	0,4164	0,4342	0,4524	0,4713
	1,15	0,3063	0,3245	0,3424	0,3601	0,3777	0,3954	0,4131	0,4310	0,4493	0,4683
	1,20	0,3019	0,3205	0,3386	0,3565	0,3744	0,3921	0,4100	0,4280	0,4464	0,4654
	1,25	0,2976	0,3166	0,3350	0,3532	0,3712	0,3891	0,4071	0,4252	0,4437	0,4627
	1,30	0,2934	0,3128	0,3316	0,3499	0,3681	0,3862	0,4043	0,4226	0,4411	0,4602
	1,35	0,2893	0,3092	0,3283	0,3469	0,3652	0,3835	0,4017	0,4201	0,4387	0,4579
	1,40	0,2853	0,3057	0,3251	0,3440	0,3625	0,3809	0,3993	0,4177	0,4364	0,4557
	1,45	0,2813	0,3023	0,3220	0,3412	0,3599	0,3784	0,3969	0,4155	0,4343	0,4536
	1,50	0,2772	0,2989	0,3191	0,3385	0,3574	0,3761	0,3947	0,4134	0,4322	0,4516
0,25	1,00	0,3340	0,3513	0,3685	0,3855	0,4026	0,4198	0,4370	0,4546	0,4727	0,4849
	1,05	0,3274	0,3452	0,3627	0,3801	0,3974	0,4148	0,4323	0,4500	0,4683	0,4831
	1,10	0,3210	0,3393	0,3572	0,3749	0,3925	0,4101	0,4278	0,4457	0,4641	0,4814
	1,15	0,3145	0,3334	0,3518	0,3699	0,3878	0,4057	0,4236	0,4417	0,4602	0,4797
	1,20	0,3080	0,3277	0,3466	0,3651	0,3833	0,4014	0,4195	0,4378	0,4564	0,4760
	1,25	0,3013	0,3220	0,3415	0,3604	0,3790	0,3974	0,4157	0,4341	0,4529	0,4725
	1,30	0,2942	0,3162	0,3365	0,3559	0,3748	0,3935	0,4120	0,4307	0,4496	0,4692
	1,35	0,2866	0,3104	0,3315	0,3515	0,3708	0,3897	0,4085	0,4273	0,4464	0,4661
	1,40	0,2776	0,3044	0,3266	0,3471	0,3669	0,3861	0,4051	0,4242	0,4434	0,4632
	1,45	0,2645	0,2980	0,3216	0,3429	0,3631	0,3826	0,4019	0,4211	0,4405	0,4604
	1,50		0,2909	0,3166	0,3387	0,3594	0,3793	0,3988	0,4182	0,4377	0,4577
0,3	1,00	0,3502	0,3671	0,3840	0,4008	0,4176	0,4345	0,4515	0,4688	0,4830	0,4911
	1,05	0,3424	0,3599	0,3772	0,3944	0,4115	0,4287	0,4460	0,4636	0,4808	0,4889
	1,10	0,3345	0,3527	0,3705	0,3881	0,4056	0,4231	0,4407	0,4585	0,4769	0,4868
	1,15	0,3264	0,3455	0,3639	0,3820	0,3999	0,4177	0,4356	0,4537	0,4723	0,4849
	1,20	0,3177	0,3381	0,3573	0,3760	0,3944	0,4125	0,4307	0,4490	0,4678	0,4831
	1,25	0,3080	0,3303	0,3507	0,3701	0,3889	0,4075	0,4260	0,4446	0,4635	0,4814
	1,30	0,2961	0,3221	0,3439	0,3641	0,3835	0,4026	0,4214	0,4402	0,4594	0,4796
	1,35	0,2414	0,3128	0,3368	0,3581	0,3782	0,3977	0,4169	0,4361	0,4555	0,4757
	1,40		0,3009	0,3292	0,3520	0,3730	0,3930	0,4126	0,4321	0,4517	0,4721
	1,45			0,3208	0,3457	0,3677	0,3883	0,4084	0,4282	0,4480	0,4685
	1,50			0,3104	0,3391	0,3623	0,3837	0,4042	0,4244	0,4445	0,4652

μ_{lu} pour S 500 A ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 27

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,3023	0,3175	0,3329	0,3485	0,3642	0,3802	0,3964	0,4128	0,4297	0,4470
0,05	1,00	0,3061	0,3219	0,3378	0,3538	0,3700	0,3863	0,4029	0,4197	0,4370	0,4547
	1,05	0,3054	0,3211	0,3370	0,3530	0,3692	0,3856	0,4022	0,4190	0,4363	0,4540
	1,10	0,3047	0,3204	0,3363	0,3524	0,3686	0,3849	0,4015	0,4184	0,4356	0,4534
	1,15	0,3040	0,3198	0,3357	0,3517	0,3679	0,3843	0,4009	0,4178	0,4350	0,4528
	1,20	0,3034	0,3192	0,3351	0,3512	0,3674	0,3838	0,4004	0,4172	0,4345	0,4523
	1,25	0,3029	0,3187	0,3346	0,3506	0,3668	0,3832	0,3998	0,4167	0,4340	0,4518
	1,30	0,3024	0,3182	0,3341	0,3501	0,3664	0,3828	0,3994	0,4163	0,4335	0,4513
	1,35	0,3019	0,3177	0,3336	0,3497	0,3659	0,3823	0,3989	0,4158	0,4331	0,4509
	1,40	0,3015	0,3173	0,3332	0,3493	0,3655	0,3819	0,3985	0,4154	0,4327	0,4505
	1,45	0,3010	0,3169	0,3328	0,3489	0,3651	0,3815	0,3981	0,4150	0,4323	0,4501
	1,50	0,3007	0,3165	0,3324	0,3485	0,3647	0,3812	0,3978	0,4147	0,4320	0,4497
0,1	1,00	0,3112	0,3275	0,3439	0,3604	0,3770	0,3937	0,4106	0,4278	0,4454	0,4636
	1,05	0,3095	0,3258	0,3422	0,3588	0,3754	0,3921	0,4091	0,4263	0,4439	0,4621
	1,10	0,3078	0,3242	0,3407	0,3572	0,3739	0,3907	0,4077	0,4249	0,4425	0,4608
	1,15	0,3063	0,3228	0,3393	0,3559	0,3725	0,3894	0,4064	0,4236	0,4413	0,4595
	1,20	0,3050	0,3214	0,3380	0,3546	0,3713	0,3881	0,4052	0,4225	0,4401	0,4584
	1,25	0,3037	0,3202	0,3368	0,3534	0,3701	0,3870	0,4041	0,4214	0,4390	0,4573
	1,30	0,3025	0,3190	0,3356	0,3523	0,3691	0,3860	0,4030	0,4204	0,4380	0,4563
	1,35	0,3014	0,3180	0,3346	0,3513	0,3681	0,3850	0,4021	0,4194	0,4371	0,4554
	1,40	0,3003	0,3170	0,3336	0,3503	0,3671	0,3841	0,4012	0,4185	0,4363	0,4545
	1,45	0,2994	0,3160	0,3327	0,3494	0,3662	0,3832	0,4003	0,4177	0,4354	0,4537
	1,50	0,2984	0,3151	0,3318	0,3486	0,3654	0,3824	0,3996	0,4169	0,4347	0,4530
0,15	1,00	0,3180	0,3349	0,3517	0,3686	0,3855	0,4025	0,4197	0,4372	0,4550	0,4737
	1,05	0,3150	0,3320	0,3489	0,3659	0,3829	0,4000	0,4173	0,4348	0,4527	0,4714
	1,10	0,3122	0,3293	0,3464	0,3634	0,3805	0,3977	0,4150	0,4326	0,4506	0,4693
	1,15	0,3096	0,3268	0,3440	0,3611	0,3783	0,3955	0,4129	0,4306	0,4486	0,4673
	1,20	0,3071	0,3245	0,3417	0,3590	0,3762	0,3935	0,4110	0,4287	0,4467	0,4655
	1,25	0,3048	0,3223	0,3397	0,3570	0,3743	0,3917	0,4092	0,4269	0,4450	0,4638
	1,30	0,3027	0,3203	0,3377	0,3551	0,3725	0,3899	0,4075	0,4253	0,4434	0,4622
	1,35	0,3006	0,3183	0,3359	0,3533	0,3708	0,3883	0,4059	0,4237	0,4419	0,4607
	1,40	0,2987	0,3165	0,3342	0,3517	0,3692	0,3868	0,4044	0,4223	0,4405	0,4593
	1,45	0,2969	0,3148	0,3325	0,3501	0,3677	0,3853	0,4031	0,4210	0,4392	0,4580
	1,50	0,2951	0,3132	0,3310	0,3487	0,3663	0,3840	0,4017	0,4197	0,4380	0,4568
0,2	1,00	0,3270	0,3443	0,3614	0,3785	0,3957	0,4129	0,4302	0,4478	0,4659	0,4821
	1,05	0,3225	0,3401	0,3574	0,3747	0,3920	0,4094	0,4268	0,4445	0,4627	0,4808
	1,10	0,3183	0,3361	0,3537	0,3712	0,3886	0,4061	0,4237	0,4415	0,4598	0,4790
	1,15	0,3142	0,3323	0,3501	0,3678	0,3854	0,4030	0,4207	0,4387	0,4570	0,4762
	1,20	0,3103	0,3287	0,3468	0,3646	0,3824	0,4002	0,4180	0,4360	0,4544	0,4737
	1,25	0,3066	0,3253	0,3436	0,3617	0,3796	0,3975	0,4154	0,4335	0,4520	0,4713
	1,30	0,3030	0,3220	0,3406	0,3588	0,3769	0,3949	0,4130	0,4312	0,4498	0,4691
	1,35	0,2994	0,3189	0,3377	0,3561	0,3744	0,3925	0,4107	0,4290	0,4476	0,4670
	1,40	0,2960	0,3159	0,3349	0,3536	0,3720	0,3902	0,4085	0,4269	0,4456	0,4650
	1,45	0,2927	0,3129	0,3323	0,3511	0,3697	0,3881	0,4065	0,4250	0,4438	0,4632
	1,50	0,2894	0,3101	0,3298	0,3488	0,3675	0,3860	0,4045	0,4231	0,4420	0,4614
0,25	1,00	0,3388	0,3561	0,3733	0,3905	0,4076	0,4248	0,4421	0,4596	0,4779	0,4872
	1,05	0,3328	0,3506	0,3681	0,3855	0,4029	0,4203	0,4378	0,4556	0,4739	0,4855
	1,10	0,3269	0,3452	0,3631	0,3809	0,3985	0,4161	0,4338	0,4517	0,4702	0,4840
	1,15	0,3211	0,3400	0,3583	0,3764	0,3943	0,4121	0,4300	0,4481	0,4666	0,4826
	1,20	0,3153	0,3348	0,3536	0,3721	0,3902	0,4083	0,4264	0,4446	0,4633	0,4813
	1,25	0,3094	0,3298	0,3491	0,3679	0,3864	0,4047	0,4230	0,4414	0,4602	0,4800
	1,30	0,3035	0,3248	0,3447	0,3639	0,3827	0,4012	0,4197	0,4383	0,4573	0,4771
	1,35	0,2972	0,3198	0,3404	0,3600	0,3791	0,3979	0,4166	0,4354	0,4544	0,4744
	1,40	0,2904	0,3147	0,3361	0,3563	0,3757	0,3947	0,4136	0,4326	0,4518	0,4718
	1,45	0,2826	0,3095	0,3319	0,3526	0,3724	0,3917	0,4108	0,4299	0,4492	0,4693
	1,50	0,2723	0,3042	0,3277	0,3490	0,3692	0,3888	0,4081	0,4274	0,4468	0,4669
0,3	1,00	0,3533	0,3704	0,3873	0,4042	0,4210	0,4380	0,4550	0,4724	0,4846	0,4927
	1,05	0,3460	0,3637	0,3811	0,3983	0,4155	0,4327	0,4500	0,4676	0,4826	0,4907
	1,10	0,3387	0,3570	0,3749	0,3926	0,4101	0,4276	0,4452	0,4631	0,4807	0,4888
	1,15	0,3312	0,3504	0,3689	0,3870	0,4049	0,4228	0,4406	0,4587	0,4774	0,4871
	1,20	0,3233	0,3436	0,3629	0,3816	0,3999	0,4181	0,4362	0,4546	0,4734	0,4855
	1,25	0,3146	0,3367	0,3569	0,3762	0,3950	0,4135	0,4320	0,4506	0,4696	0,4839
	1,30	0,3045	0,3294	0,3508	0,3709	0,3902	0,4091	0,4279	0,4467	0,4660	0,4825
	1,35	0,2898	0,3214	0,3446	0,3656	0,3855	0,4049	0,4240	0,4430	0,4625	0,4812
	1,40		0,3122	0,3382	0,3603	0,3808	0,4007	0,4201	0,4395	0,4591	0,4797
	1,45		0,2995	0,3312	0,3549	0,3762	0,3966	0,4164	0,4361	0,4559	0,4766
	1,50			0,3235	0,3493	0,3717	0,3926	0,4128	0,4327	0,4528	0,4736

μ_{lu} pour S 500 B ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 6

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1200	0,1283	0,1367	0,1454	0,1542	0,1633	0,1726	0,1821	0,1919	0,2018
0,05	1,00	0,1375	0,1474	0,1575	0,1677	0,1781	0,1886	0,1993	0,2102	0,2213	0,2326
	1,05	0,1344	0,1444	0,1545	0,1647	0,1751	0,1856	0,1963	0,2072	0,2183	0,2295
	1,10	0,1316	0,1416	0,1517	0,1619	0,1723	0,1829	0,1936	0,2044	0,2155	0,2268
	1,15	0,1289	0,1390	0,1491	0,1594	0,1698	0,1803	0,1910	0,2019	0,2129	0,2242
	1,20	0,1264	0,1365	0,1467	0,1570	0,1674	0,1780	0,1887	0,1995	0,2106	0,2218
	1,25	0,1240	0,1342	0,1444	0,1548	0,1652	0,1757	0,1865	0,1973	0,2084	0,2196
	1,30	0,1218	0,1320	0,1423	0,1527	0,1631	0,1737	0,1844	0,1953	0,2063	0,2176
	1,35	0,1196	0,1300	0,1403	0,1507	0,1612	0,1718	0,1825	0,1934	0,2044	0,2156
	1,40	0,1176	0,1280	0,1384	0,1488	0,1593	0,1700	0,1807	0,1916	0,2026	0,2139
	1,45	0,1156	0,1262	0,1366	0,1471	0,1576	0,1682	0,1790	0,1899	0,2009	0,2122
	1,50	0,1137	0,1244	0,1349	0,1454	0,1560	0,1666	0,1774	0,1883	0,1994	0,2106
0,1	1,00	0,1683	0,1794	0,1905	0,2017	0,2131	0,2247	0,2364	0,2483	0,2604	0,2726
	1,05	0,1617	0,1729	0,1841	0,1954	0,2069	0,2185	0,2302	0,2421	0,2542	0,2664
	1,10	0,1553	0,1666	0,1780	0,1894	0,2010	0,2126	0,2244	0,2363	0,2483	0,2606
	1,15	0,1488	0,1605	0,1721	0,1837	0,1953	0,2070	0,2188	0,2308	0,2429	0,2552
	1,20	0,1423	0,1545	0,1663	0,1781	0,1899	0,2017	0,2136	0,2256	0,2378	0,2501
	1,25	0,1354	0,1483	0,1607	0,1727	0,1847	0,1966	0,2086	0,2207	0,2329	0,2452
	1,30	0,1278	0,1420	0,1550	0,1674	0,1796	0,1917	0,2039	0,2160	0,2283	0,2407
	1,35	0,1176	0,1352	0,1492	0,1621	0,1747	0,1870	0,1993	0,2116	0,2239	0,2363
	1,40	0,0862	0,1271	0,1430	0,1568	0,1698	0,1824	0,1948	0,2073	0,2197	0,2322
	1,45		0,0844	0,1363	0,1513	0,1649	0,1779	0,1906	0,2031	0,2157	0,2283
	1,50			0,1280	0,1456	0,1600	0,1734	0,1864	0,1991	0,2118	0,2245
0,15	1,00	0,2076	0,2191	0,2309	0,2427	0,2548	0,2670	0,2794	0,2919	0,3047	0,3176
	1,05	0,1987	0,2104	0,2221	0,2340	0,2461	0,2583	0,2706	0,2832	0,2959	0,3088
	1,10	0,1900	0,2018	0,2137	0,2256	0,2377	0,2500	0,2623	0,2749	0,2876	0,3005
	1,15	0,1813	0,1933	0,2054	0,2175	0,2297	0,2420	0,2544	0,2670	0,2797	0,2927
	1,20	0,1724	0,1848	0,1971	0,2094	0,2218	0,2342	0,2468	0,2594	0,2722	0,2852
	1,25	0,1627	0,1760	0,1888	0,2015	0,2141	0,2267	0,2393	0,2521	0,2650	0,2780
	1,30	0,1515	0,1664	0,1802	0,1934	0,2064	0,2192	0,2321	0,2450	0,2580	0,2711
	1,35	0,1378	0,1551	0,1708	0,1850	0,1986	0,2118	0,2250	0,2381	0,2513	0,2645
	1,40	0,1336	0,1382	0,1597	0,1760	0,1905	0,2044	0,2179	0,2313	0,2447	0,2580
	1,45	0,1287	0,1337	0,1385	0,1653	0,1819	0,1967	0,2108	0,2245	0,2382	0,2517
	1,50	0,1211	0,1283	0,1338	0,1472	0,1719	0,1885	0,2035	0,2178	0,2318	0,2456
0,2	1,00	0,2481	0,2603	0,2726	0,2850	0,2976	0,3104	0,3233	0,3365	0,3498	0,3634
	1,05	0,2381	0,2502	0,2624	0,2748	0,2873	0,3001	0,3129	0,3260	0,3393	0,3528
	1,10	0,2283	0,2404	0,2526	0,2649	0,2775	0,2901	0,3030	0,3160	0,3293	0,3427
	1,15	0,2186	0,2307	0,2430	0,2554	0,2679	0,2806	0,2934	0,3065	0,3197	0,3331
	1,20	0,2088	0,2211	0,2335	0,2459	0,2585	0,2713	0,2842	0,2972	0,3105	0,3239
	1,25	0,1987	0,2113	0,2239	0,2366	0,2493	0,2622	0,2752	0,2883	0,3015	0,3150
	1,30	0,1880	0,2012	0,2142	0,2272	0,2402	0,2532	0,2663	0,2795	0,2929	0,3064
	1,35	0,1787	0,1902	0,2040	0,2175	0,2309	0,2442	0,2575	0,2709	0,2844	0,2980
	1,40	0,1746	0,1792	0,1927	0,2073	0,2213	0,2351	0,2487	0,2624	0,2761	0,2898
	1,45	0,1705	0,1750	0,1797	0,1958	0,2111	0,2256	0,2398	0,2538	0,2678	0,2817
	1,50	0,1661	0,1708	0,1755	0,1809	0,1995	0,2155	0,2305	0,2451	0,2594	0,2737
0,25	1,00	0,2868	0,2995	0,3124	0,3254	0,3386	0,3520	0,3655	0,3792	0,3931	0,4072
	1,05	0,2761	0,2887	0,3015	0,3144	0,3274	0,3407	0,3541	0,3677	0,3815	0,3955
	1,10	0,2657	0,2782	0,2908	0,3037	0,3167	0,3298	0,3431	0,3566	0,3704	0,3843
	1,15	0,2554	0,2679	0,2805	0,2933	0,3062	0,3193	0,3326	0,3460	0,3597	0,3735
	1,20	0,2453	0,2578	0,2704	0,2831	0,2960	0,3091	0,3223	0,3357	0,3494	0,3632
	1,25	0,2351	0,2476	0,2603	0,2731	0,2860	0,2991	0,3123	0,3257	0,3394	0,3532
	1,30	0,2247	0,2374	0,2502	0,2631	0,2761	0,2892	0,3025	0,3160	0,3296	0,3434
	1,35	0,2169	0,2268	0,2399	0,2530	0,2662	0,2794	0,2928	0,3064	0,3201	0,3339
	1,40	0,2127	0,2176	0,2291	0,2426	0,2561	0,2696	0,2832	0,2968	0,3106	0,3246
	1,45	0,2085	0,2134	0,2183	0,2317	0,2457	0,2595	0,2734	0,2873	0,3013	0,3154
	1,50	0,2044	0,2092	0,2141	0,2196	0,2345	0,2491	0,2634	0,2777	0,2919	0,3062
0,3	1,00	0,3222	0,3356	0,3491	0,3627	0,3764	0,3903	0,4043	0,4185	0,4330	0,4477
	1,05	0,3112	0,3244	0,3378	0,3512	0,3648	0,3786	0,3925	0,4065	0,4209	0,4354
	1,10	0,3005	0,3136	0,3268	0,3401	0,3536	0,3672	0,3810	0,3950	0,4092	0,4236
	1,15	0,2901	0,3030	0,3161	0,3293	0,3427	0,3562	0,3699	0,3838	0,3979	0,4122
	1,20	0,2798	0,2927	0,3056	0,3188	0,3320	0,3455	0,3591	0,3729	0,3869	0,4012
	1,25	0,2696	0,2824	0,2953	0,3084	0,3216	0,3350	0,3486	0,3623	0,3763	0,3905
	1,30	0,2594	0,2721	0,2851	0,2981	0,3113	0,3247	0,3383	0,3520	0,3659	0,3801
	1,35	0,2525	0,2618	0,2748	0,2879	0,3011	0,3145	0,3281	0,3418	0,3558	0,3699
	1,40	0,2481	0,2535	0,2643	0,2775	0,2909	0,3044	0,3180	0,3318	0,3457	0,3599
	1,45	0,2439	0,2491	0,2544	0,2670	0,2805	0,2941	0,3079	0,3218	0,3358	0,3500
	1,50	0,2397	0,2449	0,2501	0,2559	0,2698	0,2837	0,2977	0,3117	0,3259	0,3402

μ_{lu} pour S 500 B ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 9

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1590	0,1693	0,1798	0,1905	0,2015	0,2128	0,2242	0,2359	0,2479	0,2601
0,05	1,00	0,1721	0,1838	0,1957	0,2078	0,2200	0,2325	0,2451	0,2580	0,2710	0,2843
	1,05	0,1697	0,1814	0,1933	0,2054	0,2176	0,2301	0,2427	0,2556	0,2686	0,2819
	1,10	0,1675	0,1792	0,1911	0,2032	0,2155	0,2279	0,2406	0,2534	0,2664	0,2797
	1,15	0,1654	0,1772	0,1891	0,2012	0,2135	0,2259	0,2385	0,2514	0,2644	0,2777
	1,20	0,1635	0,1753	0,1873	0,1994	0,2116	0,2241	0,2367	0,2495	0,2626	0,2759
	1,25	0,1617	0,1736	0,1855	0,1976	0,2099	0,2224	0,2350	0,2478	0,2609	0,2741
	1,30	0,1601	0,1719	0,1839	0,1960	0,2083	0,2208	0,2334	0,2462	0,2593	0,2725
	1,35	0,1585	0,1704	0,1824	0,1945	0,2068	0,2193	0,2319	0,2447	0,2578	0,2711
	1,40	0,1571	0,1690	0,1810	0,1931	0,2054	0,2179	0,2305	0,2434	0,2564	0,2697
	1,45	0,1557	0,1676	0,1797	0,1918	0,2041	0,2166	0,2292	0,2421	0,2551	0,2684
	1,50	0,1544	0,1664	0,1784	0,1906	0,2029	0,2154	0,2280	0,2409	0,2539	0,2672
0,1	1,00	0,1937	0,2067	0,2197	0,2328	0,2460	0,2594	0,2730	0,2867	0,3006	0,3148
	1,05	0,1881	0,2012	0,2143	0,2275	0,2408	0,2543	0,2679	0,2816	0,2956	0,3098
	1,10	0,1828	0,1961	0,2093	0,2226	0,2360	0,2495	0,2631	0,2769	0,2909	0,3051
	1,15	0,1776	0,1911	0,2045	0,2180	0,2314	0,2450	0,2587	0,2725	0,2866	0,3008
	1,20	0,1726	0,1864	0,2000	0,2136	0,2271	0,2408	0,2546	0,2684	0,2825	0,2967
	1,25	0,1676	0,1818	0,1956	0,2094	0,2231	0,2368	0,2506	0,2646	0,2787	0,2929
	1,30	0,1626	0,1773	0,1914	0,2054	0,2192	0,2330	0,2469	0,2610	0,2751	0,2894
	1,35	0,1575	0,1728	0,1873	0,2015	0,2155	0,2295	0,2435	0,2575	0,2717	0,2861
	1,40	0,1523	0,1684	0,1834	0,1978	0,2120	0,2261	0,2401	0,2543	0,2685	0,2829
	1,45	0,1466	0,1640	0,1795	0,1942	0,2086	0,2228	0,2370	0,2512	0,2655	0,2799
	1,50	0,1401	0,1595	0,1756	0,1907	0,2053	0,2197	0,2340	0,2483	0,2626	0,2771
0,15	1,00	0,2238	0,2373	0,2508	0,2645	0,2783	0,2922	0,3063	0,3206	0,3351	0,3498
	1,05	0,2156	0,2292	0,2429	0,2567	0,2706	0,2846	0,2988	0,3131	0,3277	0,3424
	1,10	0,2074	0,2213	0,2353	0,2493	0,2633	0,2774	0,2917	0,3061	0,3207	0,3355
	1,15	0,1991	0,2135	0,2278	0,2420	0,2563	0,2705	0,2849	0,2994	0,3141	0,3290
	1,20	0,1905	0,2057	0,2205	0,2350	0,2495	0,2639	0,2784	0,2931	0,3078	0,3228
	1,25	0,1813	0,1977	0,2131	0,2281	0,2428	0,2575	0,2722	0,2870	0,3019	0,3169
	1,30	0,1704	0,1891	0,2056	0,2212	0,2363	0,2513	0,2662	0,2812	0,2962	0,3113
	1,35	0,1373	0,1794	0,1977	0,2142	0,2299	0,2453	0,2604	0,2755	0,2907	0,3059
	1,40	0,1279	0,1661	0,1891	0,2070	0,2235	0,2393	0,2548	0,2701	0,2854	0,3008
	1,45		0,1257	0,1788	0,1995	0,2170	0,2334	0,2492	0,2648	0,2804	0,2959
	1,50			0,1230	0,1910	0,2102	0,2274	0,2438	0,2597	0,2755	0,2911
0,2	1,00	0,2582	0,2719	0,2857	0,2996	0,3137	0,3279	0,3423	0,3570	0,3718	0,3869
	1,05	0,2484	0,2622	0,2761	0,2901	0,3042	0,3186	0,3330	0,3477	0,3626	0,3777
	1,10	0,2386	0,2526	0,2667	0,2809	0,2952	0,3096	0,3241	0,3389	0,3538	0,3690
	1,15	0,2287	0,2431	0,2575	0,2719	0,2863	0,3009	0,3156	0,3304	0,3454	0,3607
	1,20	0,2184	0,2334	0,2482	0,2629	0,2777	0,2924	0,3073	0,3222	0,3374	0,3527
	1,25	0,2071	0,2233	0,2388	0,2540	0,2691	0,2841	0,2992	0,3143	0,3296	0,3450
	1,30	0,1936	0,2122	0,2289	0,2449	0,2605	0,2759	0,2913	0,3066	0,3221	0,3377
	1,35	0,1783	0,1988	0,2182	0,2354	0,2518	0,2677	0,2834	0,2991	0,3148	0,3305
	1,40	0,1729	0,1789	0,2053	0,2251	0,2427	0,2594	0,2756	0,2916	0,3076	0,3236
	1,45	0,1661	0,1732	0,1796	0,2130	0,2330	0,2508	0,2678	0,2843	0,3005	0,3168
	1,50		0,1651	0,1734	0,1930	0,2218	0,2417	0,2597	0,2768	0,2936	0,3101
0,25	1,00	0,2929	0,3068	0,3208	0,3349	0,3492	0,3637	0,3783	0,3932	0,4084	0,4238
	1,05	0,2823	0,2962	0,3103	0,3244	0,3388	0,3533	0,3679	0,3828	0,3980	0,4134
	1,10	0,2718	0,2858	0,3000	0,3142	0,3286	0,3432	0,3579	0,3728	0,3880	0,4035
	1,15	0,2613	0,2755	0,2898	0,3042	0,3187	0,3333	0,3482	0,3632	0,3784	0,3939
	1,20	0,2506	0,2651	0,2796	0,2942	0,3089	0,3237	0,3387	0,3538	0,3691	0,3847
	1,25	0,2392	0,2544	0,2693	0,2843	0,2992	0,3143	0,3294	0,3446	0,3601	0,3757
	1,30	0,2267	0,2429	0,2587	0,2741	0,2895	0,3048	0,3202	0,3356	0,3513	0,3670
	1,35	0,2166	0,2301	0,2472	0,2636	0,2795	0,2953	0,3110	0,3268	0,3426	0,3586
	1,40	0,2117	0,2174	0,2342	0,2522	0,2692	0,2856	0,3018	0,3179	0,3340	0,3502
	1,45	0,2065	0,2124	0,2182	0,2391	0,2580	0,2755	0,2924	0,3090	0,3255	0,3420
	1,50	0,2006	0,2069	0,2130	0,2205	0,2450	0,2646	0,2826	0,2999	0,3169	0,3338
0,3	1,00	0,3258	0,3399	0,3541	0,3685	0,3830	0,3977	0,4126	0,4276	0,4430	0,4588
	1,05	0,3149	0,3290	0,3432	0,3576	0,3721	0,3868	0,4016	0,4167	0,4321	0,4478
	1,10	0,3042	0,3183	0,3326	0,3469	0,3614	0,3761	0,3910	0,4061	0,4215	0,4372
	1,15	0,2936	0,3077	0,3220	0,3364	0,3510	0,3657	0,3806	0,3958	0,4112	0,4269
	1,20	0,2828	0,2971	0,3115	0,3260	0,3407	0,3555	0,3705	0,3857	0,4011	0,4169
	1,25	0,2718	0,2863	0,3010	0,3157	0,3305	0,3454	0,3605	0,3758	0,3913	0,4071
	1,30	0,2602	0,2752	0,2902	0,3052	0,3202	0,3354	0,3507	0,3661	0,3817	0,3976
	1,35	0,2522	0,2633	0,2790	0,2944	0,3098	0,3253	0,3408	0,3564	0,3723	0,3883
	1,40	0,2474	0,2533	0,2668	0,2831	0,2991	0,3150	0,3309	0,3468	0,3628	0,3791
	1,45	0,2426	0,2484	0,2543	0,2708	0,2878	0,3044	0,3208	0,3371	0,3534	0,3699
	1,50	0,2375	0,2434	0,2494	0,2563	0,2753	0,2931	0,3103	0,3272	0,3440	0,3608

μ_{lu} pour S 500 B ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 12

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1890	0,2007	0,2126	0,2248	0,2372	0,2499	0,2628	0,2759	0,2893	0,3030
0,05	1,00	0,1996	0,2125	0,2256	0,2389	0,2524	0,2661	0,2799	0,2941	0,3084	0,3230
	1,05	0,1976	0,2106	0,2237	0,2370	0,2504	0,2641	0,2780	0,2921	0,3064	0,3210
	1,10	0,1958	0,2088	0,2219	0,2352	0,2486	0,2623	0,2762	0,2903	0,3046	0,3192
	1,15	0,1941	0,2071	0,2202	0,2335	0,2470	0,2607	0,2746	0,2887	0,3030	0,3176
	1,20	0,1926	0,2056	0,2187	0,2320	0,2455	0,2592	0,2730	0,2871	0,3015	0,3161
	1,25	0,1912	0,2041	0,2173	0,2306	0,2441	0,2577	0,2716	0,2857	0,3001	0,3147
	1,30	0,1898	0,2028	0,2160	0,2293	0,2428	0,2564	0,2703	0,2844	0,2988	0,3134
	1,35	0,1886	0,2016	0,2147	0,2281	0,2416	0,2552	0,2691	0,2832	0,2976	0,3121
	1,40	0,1874	0,2004	0,2136	0,2269	0,2404	0,2541	0,2680	0,2821	0,2964	0,3110
	1,45	0,1863	0,1994	0,2125	0,2259	0,2394	0,2531	0,2669	0,2810	0,2954	0,3100
	1,50	0,1853	0,1983	0,2115	0,2249	0,2384	0,2521	0,2660	0,2801	0,2944	0,3090
0,1	1,00	0,2161	0,2302	0,2443	0,2586	0,2729	0,2875	0,3022	0,3171	0,3322	0,3475
	1,05	0,2114	0,2256	0,2399	0,2542	0,2686	0,2832	0,2979	0,3129	0,3280	0,3434
	1,10	0,2070	0,2214	0,2357	0,2501	0,2646	0,2793	0,2940	0,3090	0,3242	0,3396
	1,15	0,2028	0,2173	0,2318	0,2463	0,2609	0,2756	0,2904	0,3054	0,3206	0,3360
	1,20	0,1988	0,2135	0,2281	0,2427	0,2574	0,2721	0,2870	0,3020	0,3173	0,3327
	1,25	0,1950	0,2099	0,2246	0,2394	0,2541	0,2689	0,2838	0,2989	0,3142	0,3296
	1,30	0,1913	0,2064	0,2213	0,2362	0,2510	0,2659	0,2809	0,2960	0,3113	0,3268
	1,35	0,1878	0,2031	0,2182	0,2332	0,2481	0,2630	0,2781	0,2932	0,3085	0,3241
	1,40	0,1843	0,2000	0,2152	0,2303	0,2453	0,2603	0,2754	0,2906	0,3060	0,3215
	1,45	0,1809	0,1969	0,2123	0,2276	0,2427	0,2578	0,2729	0,2882	0,3036	0,3192
	1,50	0,1776	0,1939	0,2096	0,2250	0,2402	0,2554	0,2706	0,2859	0,3013	0,3169
0,15	1,00	0,2395	0,2542	0,2690	0,2838	0,2987	0,3138	0,3290	0,3444	0,3600	0,3759
	1,05	0,2321	0,2471	0,2621	0,2770	0,2921	0,3073	0,3226	0,3380	0,3537	0,3696
	1,10	0,2249	0,2402	0,2554	0,2706	0,2858	0,3011	0,3165	0,3321	0,3478	0,3638
	1,15	0,2177	0,2335	0,2490	0,2644	0,2798	0,2953	0,3108	0,3265	0,3423	0,3583
	1,20	0,2104	0,2268	0,2428	0,2585	0,2741	0,2897	0,3054	0,3212	0,3371	0,3532
	1,25	0,2029	0,2202	0,2366	0,2527	0,2686	0,2844	0,3002	0,3161	0,3321	0,3483
	1,30	0,1948	0,2134	0,2306	0,2471	0,2633	0,2793	0,2953	0,3113	0,3275	0,3438
	1,35	0,1855	0,2064	0,2245	0,2416	0,2581	0,2744	0,2906	0,3068	0,3230	0,3394
	1,40	0,1719	0,1988	0,2184	0,2361	0,2531	0,2697	0,2861	0,3024	0,3188	0,3353
	1,45		0,1901	0,2120	0,2307	0,2482	0,2651	0,2817	0,2982	0,3147	0,3313
	1,50		0,1775	0,2052	0,2252	0,2433	0,2606	0,2775	0,2942	0,3109	0,3276
0,2	1,00	0,2683	0,2831	0,2980	0,3130	0,3281	0,3434	0,3588	0,3744	0,3903	0,4065
	1,05	0,2589	0,2741	0,2892	0,3044	0,3197	0,3351	0,3506	0,3664	0,3823	0,3986
	1,10	0,2496	0,2652	0,2806	0,2960	0,3115	0,3271	0,3428	0,3586	0,3747	0,3910
	1,15	0,2401	0,2562	0,2721	0,2879	0,3036	0,3194	0,3353	0,3513	0,3675	0,3839
	1,20	0,2302	0,2472	0,2637	0,2799	0,2959	0,3120	0,3281	0,3442	0,3606	0,3771
	1,25	0,2191	0,2377	0,2551	0,2719	0,2884	0,3047	0,3211	0,3374	0,3539	0,3706
	1,30	0,2053	0,2274	0,2462	0,2638	0,2809	0,2976	0,3143	0,3309	0,3475	0,3644
	1,35	0,1778	0,2150	0,2367	0,2555	0,2733	0,2906	0,3076	0,3245	0,3414	0,3584
	1,40	0,1686	0,1785	0,2257	0,2468	0,2657	0,2836	0,3011	0,3183	0,3354	0,3526
	1,45		0,1673	0,2106	0,2372	0,2578	0,2766	0,2946	0,3122	0,3296	0,3470
	1,50			0,1653	0,2257	0,2494	0,2694	0,2881	0,3062	0,3240	0,3416
0,25	1,00	0,2990	0,3138	0,3287	0,3437	0,3588	0,3742	0,3897	0,4054	0,4214	0,4378
	1,05	0,2887	0,3037	0,3188	0,3339	0,3492	0,3647	0,3803	0,3961	0,4122	0,4286
	1,10	0,2784	0,2937	0,3090	0,3244	0,3399	0,3555	0,3712	0,3872	0,4034	0,4199
	1,15	0,2679	0,2837	0,2993	0,3150	0,3307	0,3465	0,3624	0,3785	0,3949	0,4115
	1,20	0,2569	0,2734	0,2896	0,3056	0,3217	0,3377	0,3539	0,3702	0,3866	0,4034
	1,25	0,2448	0,2625	0,2795	0,2962	0,3127	0,3291	0,3455	0,3620	0,3787	0,3956
	1,30	0,2302	0,2506	0,2690	0,2865	0,3036	0,3205	0,3372	0,3540	0,3709	0,3880
	1,35	0,2163	0,2360	0,2574	0,2763	0,2943	0,3118	0,3290	0,3462	0,3633	0,3806
	1,40	0,2102	0,2171	0,2433	0,2652	0,2846	0,3030	0,3208	0,3384	0,3559	0,3734
	1,45	0,2024	0,2107	0,2181	0,2520	0,2741	0,2938	0,3125	0,3306	0,3485	0,3664
	1,50		0,2015	0,2112	0,2295	0,2620	0,2840	0,3039	0,3228	0,3412	0,3595
0,3	1,00	0,3293	0,3440	0,3589	0,3739	0,3890	0,4043	0,4198	0,4356	0,4517	0,4683
	1,05	0,3187	0,3335	0,3485	0,3636	0,3788	0,3942	0,4098	0,4256	0,4418	0,4584
	1,10	0,3081	0,3231	0,3382	0,3535	0,3688	0,3844	0,4001	0,4160	0,4322	0,4489
	1,15	0,2974	0,3127	0,3280	0,3435	0,3590	0,3747	0,3905	0,4066	0,4229	0,4396
	1,20	0,2863	0,3020	0,3177	0,3335	0,3492	0,3651	0,3812	0,3974	0,4139	0,4307
	1,25	0,2745	0,2910	0,3072	0,3234	0,3395	0,3557	0,3720	0,3884	0,4050	0,4220
	1,30	0,2613	0,2791	0,2962	0,3130	0,3296	0,3462	0,3628	0,3795	0,3964	0,4135
	1,35	0,2520	0,2656	0,2844	0,3022	0,3195	0,3366	0,3536	0,3707	0,3878	0,4051
	1,40	0,2465	0,2531	0,2707	0,2904	0,3089	0,3268	0,3443	0,3618	0,3793	0,3969
	1,45	0,2407	0,2475	0,2542	0,2768	0,2974	0,3165	0,3348	0,3529	0,3708	0,3888
	1,50	0,2338	0,2413	0,2485	0,2574	0,2840	0,3053	0,3249	0,3438	0,3623	0,3807

μ_{lu} pour S 500 B ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 15

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2128	0,2255	0,2384	0,2516	0,2649	0,2786	0,2924	0,3066	0,3210	0,3357
0,05	1,00	0,2217	0,2355	0,2494	0,2635	0,2778	0,2923	0,3070	0,3220	0,3372	0,3527
	1,05	0,2201	0,2338	0,2477	0,2619	0,2762	0,2907	0,3054	0,3203	0,3355	0,3510
	1,10	0,2185	0,2323	0,2462	0,2603	0,2746	0,2891	0,3039	0,3188	0,3340	0,3495
	1,15	0,2171	0,2309	0,2448	0,2589	0,2732	0,2878	0,3025	0,3174	0,3326	0,3481
	1,20	0,2158	0,2296	0,2435	0,2576	0,2720	0,2865	0,3012	0,3161	0,3314	0,3468
	1,25	0,2146	0,2284	0,2423	0,2565	0,2708	0,2853	0,3000	0,3150	0,3302	0,3457
	1,30	0,2135	0,2273	0,2412	0,2553	0,2697	0,2842	0,2989	0,3139	0,3291	0,3446
	1,35	0,2124	0,2262	0,2402	0,2543	0,2686	0,2832	0,2979	0,3129	0,3281	0,3435
	1,40	0,2114	0,2252	0,2392	0,2534	0,2677	0,2822	0,2969	0,3119	0,3271	0,3426
	1,45	0,2105	0,2243	0,2383	0,2525	0,2668	0,2813	0,2961	0,3110	0,3262	0,3417
	1,50	0,2097	0,2235	0,2375	0,2516	0,2660	0,2805	0,2952	0,3102	0,3254	0,3409
0,1	1,00	0,2350	0,2498	0,2647	0,2797	0,2948	0,3100	0,3255	0,3411	0,3570	0,3732
	1,05	0,2310	0,2459	0,2609	0,2759	0,2911	0,3064	0,3219	0,3376	0,3535	0,3697
	1,10	0,2273	0,2423	0,2574	0,2725	0,2877	0,3031	0,3186	0,3343	0,3502	0,3664
	1,15	0,2238	0,2390	0,2541	0,2693	0,2846	0,3000	0,3155	0,3313	0,3472	0,3635
	1,20	0,2205	0,2358	0,2510	0,2663	0,2816	0,2971	0,3127	0,3285	0,3445	0,3607
	1,25	0,2174	0,2328	0,2481	0,2635	0,2789	0,2944	0,3100	0,3258	0,3419	0,3581
	1,30	0,2145	0,2300	0,2454	0,2608	0,2763	0,2919	0,3076	0,3234	0,3394	0,3557
	1,35	0,2117	0,2273	0,2429	0,2584	0,2739	0,2895	0,3052	0,3211	0,3372	0,3535
	1,40	0,2090	0,2248	0,2405	0,2560	0,2716	0,2873	0,3030	0,3190	0,3351	0,3514
	1,45	0,2064	0,2224	0,2382	0,2538	0,2695	0,2852	0,3010	0,3169	0,3331	0,3494
	1,50	0,2040	0,2201	0,2360	0,2517	0,2674	0,2832	0,2991	0,3150	0,3312	0,3476
0,15	1,00	0,2538	0,2693	0,2848	0,3004	0,3160	0,3318	0,3477	0,3638	0,3801	0,3968
	1,05	0,2473	0,2630	0,2788	0,2945	0,3103	0,3261	0,3422	0,3584	0,3748	0,3914
	1,10	0,2410	0,2571	0,2730	0,2889	0,3049	0,3209	0,3370	0,3533	0,3697	0,3865
	1,15	0,2348	0,2513	0,2675	0,2836	0,2997	0,3159	0,3321	0,3485	0,3651	0,3819
	1,20	0,2287	0,2457	0,2622	0,2786	0,2949	0,3112	0,3275	0,3440	0,3606	0,3775
	1,25	0,2226	0,2402	0,2571	0,2738	0,2902	0,3067	0,3232	0,3398	0,3565	0,3734
	1,30	0,2165	0,2348	0,2522	0,2691	0,2858	0,3025	0,3191	0,3358	0,3526	0,3696
	1,35	0,2101	0,2294	0,2473	0,2646	0,2816	0,2984	0,3152	0,3320	0,3489	0,3660
	1,40	0,2032	0,2239	0,2426	0,2603	0,2775	0,2945	0,3114	0,3284	0,3454	0,3625
	1,45	0,1955	0,2184	0,2379	0,2560	0,2736	0,2908	0,3079	0,3249	0,3420	0,3593
	1,50	0,1851	0,2126	0,2332	0,2519	0,2698	0,2872	0,3045	0,3217	0,3389	0,3562
0,2	1,00	0,2778	0,2935	0,3092	0,3249	0,3408	0,3567	0,3728	0,3891	0,4057	0,4226
	1,05	0,2692	0,2852	0,3012	0,3172	0,3332	0,3494	0,3656	0,3821	0,3987	0,4157
	1,10	0,2606	0,2771	0,2935	0,3097	0,3260	0,3423	0,3587	0,3753	0,3921	0,4092
	1,15	0,2519	0,2691	0,2859	0,3025	0,3190	0,3356	0,3522	0,3689	0,3859	0,4031
	1,20	0,2429	0,2610	0,2784	0,2954	0,3123	0,3291	0,3459	0,3628	0,3799	0,3972
	1,25	0,2330	0,2526	0,2709	0,2885	0,3057	0,3228	0,3399	0,3570	0,3742	0,3917
	1,30	0,2215	0,2438	0,2632	0,2815	0,2993	0,3167	0,3341	0,3514	0,3688	0,3864
	1,35	0,2024	0,2339	0,2553	0,2746	0,2929	0,3108	0,3285	0,3460	0,3636	0,3813
	1,40		0,2215	0,2468	0,2675	0,2866	0,3050	0,3230	0,3408	0,3586	0,3765
	1,45			0,2372	0,2601	0,2802	0,2992	0,3176	0,3358	0,3538	0,3718
	1,50			0,2245	0,2522	0,2738	0,2935	0,3124	0,3308	0,3491	0,3674
0,25	1,00	0,3049	0,3204	0,3360	0,3517	0,3675	0,3834	0,3995	0,4158	0,4325	0,4496
	1,05	0,2951	0,3109	0,3268	0,3427	0,3587	0,3748	0,3910	0,4075	0,4243	0,4414
	1,10	0,2852	0,3015	0,3177	0,3339	0,3501	0,3665	0,3829	0,3996	0,4164	0,4337
	1,15	0,2750	0,2920	0,3087	0,3252	0,3418	0,3584	0,3750	0,3919	0,4089	0,4263
	1,20	0,2642	0,2821	0,2995	0,3166	0,3336	0,3505	0,3674	0,3845	0,4017	0,4192
	1,25	0,2520	0,2718	0,2902	0,3080	0,3254	0,3427	0,3600	0,3773	0,3947	0,4124
	1,30	0,2363	0,2602	0,2803	0,2991	0,3172	0,3350	0,3527	0,3703	0,3880	0,4059
	1,35	0,2158	0,2457	0,2695	0,2899	0,3090	0,3274	0,3455	0,3634	0,3814	0,3995
	1,40	0,2073	0,2168	0,2566	0,2800	0,3004	0,3196	0,3383	0,3567	0,3750	0,3933
	1,45		0,2069	0,2323	0,2686	0,2914	0,3118	0,3312	0,3500	0,3687	0,3873
	1,50			0,2063	0,2532	0,2814	0,3036	0,3239	0,3434	0,3625	0,3815
0,3	1,00	0,3326	0,3479	0,3633	0,3788	0,3944	0,4102	0,4262	0,4424	0,4590	0,4764
	1,05	0,3224	0,3379	0,3535	0,3692	0,3850	0,4009	0,4170	0,4334	0,4501	0,4675
	1,10	0,3120	0,3279	0,3437	0,3596	0,3757	0,3918	0,4081	0,4247	0,4415	0,4589
	1,15	0,3014	0,3177	0,3339	0,3502	0,3665	0,3829	0,3994	0,4161	0,4332	0,4506
	1,20	0,2902	0,3072	0,3240	0,3407	0,3574	0,3741	0,3909	0,4078	0,4251	0,4427
	1,25	0,2779	0,2961	0,3138	0,3311	0,3483	0,3653	0,3825	0,3997	0,4171	0,4349
	1,30	0,2631	0,2839	0,3030	0,3212	0,3390	0,3566	0,3741	0,3917	0,4094	0,4274
	1,35	0,2516	0,2690	0,2910	0,3107	0,3295	0,3477	0,3658	0,3837	0,4017	0,4200
	1,40	0,2453	0,2528	0,2765	0,2992	0,3195	0,3387	0,3574	0,3758	0,3942	0,4127
	1,45	0,2375	0,2461	0,2541	0,2854	0,3085	0,3292	0,3488	0,3679	0,3867	0,4056
	1,50	0,2171	0,2372	0,2470	0,2619	0,2958	0,3190	0,3399	0,3598	0,3792	0,3986

μ_{lu} pour S 500 B ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 18

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2322	0,2455	0,2591	0,2730	0,2871	0,3014	0,3159	0,3307	0,3458	0,3612
0,05	1,00	0,2398	0,2541	0,2686	0,2833	0,2982	0,3133	0,3286	0,3441	0,3599	0,3760
	1,05	0,2384	0,2527	0,2672	0,2819	0,2968	0,3118	0,3271	0,3427	0,3585	0,3746
	1,10	0,2370	0,2514	0,2659	0,2806	0,2954	0,3105	0,3258	0,3414	0,3572	0,3733
	1,15	0,2358	0,2501	0,2647	0,2794	0,2942	0,3093	0,3246	0,3402	0,3560	0,3721
	1,20	0,2346	0,2490	0,2635	0,2782	0,2931	0,3082	0,3235	0,3391	0,3549	0,3710
	1,25	0,2336	0,2480	0,2625	0,2772	0,2921	0,3072	0,3225	0,3380	0,3539	0,3700
	1,30	0,2326	0,2470	0,2615	0,2763	0,2912	0,3062	0,3216	0,3371	0,3529	0,3690
	1,35	0,2317	0,2461	0,2607	0,2754	0,2903	0,3054	0,3207	0,3362	0,3520	0,3681
	1,40	0,2309	0,2453	0,2598	0,2745	0,2894	0,3045	0,3199	0,3354	0,3512	0,3673
	1,45	0,2301	0,2445	0,2590	0,2738	0,2887	0,3038	0,3191	0,3347	0,3505	0,3666
	1,50	0,2294	0,2438	0,2583	0,2730	0,2880	0,3031	0,3184	0,3339	0,3498	0,3659
0,1	1,00	0,2508	0,2661	0,2815	0,2970	0,3126	0,3283	0,3443	0,3604	0,3768	0,3935
	1,05	0,2474	0,2628	0,2782	0,2938	0,3094	0,3252	0,3412	0,3574	0,3738	0,3905
	1,10	0,2442	0,2597	0,2752	0,2908	0,3065	0,3223	0,3383	0,3546	0,3710	0,3878
	1,15	0,2412	0,2568	0,2724	0,2880	0,3038	0,3197	0,3357	0,3520	0,3684	0,3852
	1,20	0,2385	0,2541	0,2698	0,2855	0,3013	0,3172	0,3333	0,3496	0,3661	0,3828
	1,25	0,2358	0,2516	0,2673	0,2831	0,2989	0,3149	0,3310	0,3473	0,3638	0,3807
	1,30	0,2334	0,2492	0,2650	0,2808	0,2967	0,3127	0,3289	0,3452	0,3618	0,3786
	1,35	0,2310	0,2470	0,2628	0,2787	0,2947	0,3107	0,3269	0,3433	0,3598	0,3767
	1,40	0,2288	0,2449	0,2608	0,2768	0,2928	0,3088	0,3251	0,3414	0,3580	0,3749
	1,45	0,2267	0,2429	0,2589	0,2749	0,2909	0,3071	0,3233	0,3397	0,3564	0,3732
	1,50	0,2247	0,2410	0,2571	0,2731	0,2892	0,3054	0,3217	0,3381	0,3548	0,3717
0,15	1,00	0,2664	0,2824	0,2984	0,3144	0,3305	0,3468	0,3631	0,3797	0,3965	0,4137
	1,05	0,2606	0,2769	0,2931	0,3093	0,3255	0,3419	0,3583	0,3750	0,3919	0,4091
	1,10	0,2551	0,2717	0,2881	0,3044	0,3208	0,3373	0,3538	0,3706	0,3875	0,4048
	1,15	0,2498	0,2667	0,2833	0,2998	0,3164	0,3330	0,3496	0,3665	0,3835	0,4008
	1,20	0,2447	0,2619	0,2788	0,2955	0,3122	0,3289	0,3457	0,3626	0,3797	0,3971
	1,25	0,2396	0,2572	0,2744	0,2914	0,3082	0,3251	0,3420	0,3590	0,3762	0,3936
	1,30	0,2347	0,2528	0,2703	0,2875	0,3045	0,3215	0,3385	0,3556	0,3728	0,3903
	1,35	0,2297	0,2484	0,2663	0,2837	0,3009	0,3180	0,3351	0,3523	0,3697	0,3873
	1,40	0,2248	0,2441	0,2624	0,2801	0,2975	0,3148	0,3320	0,3493	0,3667	0,3843
	1,45	0,2197	0,2399	0,2586	0,2766	0,2942	0,3117	0,3290	0,3464	0,3639	0,3816
	1,50	0,2145	0,2357	0,2550	0,2733	0,2911	0,3087	0,3262	0,3437	0,3612	0,3790
0,2	1,00	0,2867	0,3029	0,3192	0,3354	0,3517	0,3681	0,3847	0,4015	0,4185	0,4359
	1,05	0,2788	0,2955	0,3120	0,3285	0,3450	0,3616	0,3783	0,3952	0,4124	0,4299
	1,10	0,2710	0,2882	0,3050	0,3218	0,3386	0,3554	0,3723	0,3893	0,4066	0,4242
	1,15	0,2632	0,2810	0,2983	0,3154	0,3324	0,3494	0,3665	0,3837	0,4011	0,4189
	1,20	0,2552	0,2738	0,2917	0,3092	0,3265	0,3438	0,3610	0,3784	0,3960	0,4138
	1,25	0,2468	0,2665	0,2851	0,3031	0,3208	0,3383	0,3558	0,3734	0,3911	0,4090
	1,30	0,2375	0,2591	0,2786	0,2972	0,3152	0,3331	0,3508	0,3685	0,3864	0,4044
	1,35	0,2262	0,2512	0,2720	0,2913	0,3098	0,3280	0,3460	0,3639	0,3819	0,4001
	1,40		0,2425	0,2652	0,2854	0,3045	0,3231	0,3413	0,3595	0,3777	0,3960
	1,45		0,2319	0,2581	0,2795	0,2993	0,3183	0,3368	0,3552	0,3736	0,3921
	1,50			0,2504	0,2735	0,2941	0,3136	0,3325	0,3511	0,3697	0,3883
0,25	1,00	0,3106	0,3266	0,3427	0,3589	0,3751	0,3914	0,4080	0,4247	0,4418	0,4594
	1,05	0,3013	0,3178	0,3342	0,3506	0,3671	0,3837	0,4004	0,4173	0,4345	0,4522
	1,10	0,2919	0,3089	0,3258	0,3426	0,3593	0,3761	0,3931	0,4102	0,4275	0,4454
	1,15	0,2822	0,3000	0,3174	0,3346	0,3518	0,3689	0,3860	0,4033	0,4209	0,4388
	1,20	0,2720	0,2909	0,3091	0,3268	0,3443	0,3618	0,3792	0,3968	0,4145	0,4326
	1,25	0,2604	0,2813	0,3005	0,3190	0,3370	0,3549	0,3726	0,3904	0,4084	0,4266
	1,30	0,2455	0,2707	0,2916	0,3111	0,3298	0,3481	0,3662	0,3843	0,4025	0,4209
	1,35	0,2150	0,2579	0,2821	0,3029	0,3225	0,3413	0,3599	0,3783	0,3967	0,4154
	1,40	0,1944	0,2162	0,2712	0,2944	0,3151	0,3346	0,3537	0,3725	0,3912	0,4100
	1,45			0,2566	0,2850	0,3074	0,3279	0,3476	0,3668	0,3858	0,4049
	1,50				0,2741	0,2993	0,3211	0,3414	0,3611	0,3805	0,3999
0,3	1,00	0,3359	0,3516	0,3674	0,3833	0,3993	0,4154	0,4317	0,4483	0,4654	0,4814
	1,05	0,3260	0,3421	0,3581	0,3743	0,3905	0,4068	0,4234	0,4401	0,4573	0,4752
	1,10	0,3159	0,3325	0,3489	0,3654	0,3819	0,3985	0,4152	0,4322	0,4495	0,4675
	1,15	0,3055	0,3227	0,3397	0,3565	0,3734	0,3903	0,4073	0,4245	0,4420	0,4601
	1,20	0,2944	0,3126	0,3302	0,3477	0,3650	0,3822	0,3995	0,4170	0,4347	0,4529
	1,25	0,2819	0,3018	0,3205	0,3387	0,3565	0,3742	0,3919	0,4097	0,4276	0,4460
	1,30	0,2657	0,2896	0,3101	0,3294	0,3480	0,3662	0,3844	0,4025	0,4207	0,4393
	1,35	0,2512	0,2741	0,2986	0,3196	0,3392	0,3582	0,3769	0,3954	0,4140	0,4328
	1,40	0,2434	0,2525	0,2844	0,3088	0,3301	0,3500	0,3693	0,3883	0,4073	0,4264
	1,45	0,2257	0,2438	0,2540	0,2961	0,3202	0,3416	0,3617	0,3813	0,4007	0,4202
	1,50			0,2443	0,2764	0,3090	0,3326	0,3539	0,3743	0,3942	0,4140

μ_{lu} pour S 500 B ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 21

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2481	0,2620	0,2761	0,2905	0,3050	0,3198	0,3349	0,3502	0,3658	0,3817
0,05	1,00	0,2548	0,2696	0,2845	0,2996	0,3148	0,3303	0,3460	0,3619	0,3782	0,3947
	1,05	0,2535	0,2683	0,2832	0,2983	0,3136	0,3290	0,3447	0,3607	0,3769	0,3935
	1,10	0,2523	0,2671	0,2820	0,2971	0,3124	0,3279	0,3436	0,3595	0,3758	0,3923
	1,15	0,2512	0,2660	0,2810	0,2961	0,3114	0,3268	0,3425	0,3585	0,3747	0,3913
	1,20	0,2502	0,2650	0,2800	0,2951	0,3104	0,3259	0,3416	0,3575	0,3738	0,3903
	1,25	0,2493	0,2641	0,2791	0,2942	0,3095	0,3250	0,3407	0,3566	0,3729	0,3894
	1,30	0,2485	0,2633	0,2782	0,2933	0,3086	0,3241	0,3399	0,3558	0,3721	0,3886
	1,35	0,2477	0,2625	0,2774	0,2926	0,3079	0,3234	0,3391	0,3551	0,3713	0,3879
	1,40	0,2469	0,2617	0,2767	0,2918	0,3071	0,3227	0,3384	0,3543	0,3706	0,3872
	1,45	0,2462	0,2610	0,2760	0,2912	0,3065	0,3220	0,3377	0,3537	0,3699	0,3865
	1,50	0,2456	0,2604	0,2754	0,2905	0,3058	0,3214	0,3371	0,3531	0,3693	0,3859
0,1	1,00	0,2642	0,2799	0,2956	0,3114	0,3273	0,3434	0,3597	0,3762	0,3929	0,4100
	1,05	0,2612	0,2769	0,2927	0,3085	0,3245	0,3407	0,3570	0,3735	0,3903	0,4074
	1,10	0,2584	0,2742	0,2900	0,3059	0,3220	0,3381	0,3545	0,3710	0,3878	0,4050
	1,15	0,2558	0,2717	0,2876	0,3035	0,3196	0,3358	0,3522	0,3688	0,3856	0,4028
	1,20	0,2534	0,2693	0,2853	0,3013	0,3174	0,3336	0,3501	0,3667	0,3835	0,4007
	1,25	0,2511	0,2671	0,2831	0,2992	0,3154	0,3316	0,3481	0,3647	0,3816	0,3988
	1,30	0,2490	0,2651	0,2811	0,2973	0,3135	0,3298	0,3462	0,3629	0,3798	0,3970
	1,35	0,2470	0,2631	0,2793	0,2954	0,3117	0,3280	0,3445	0,3612	0,3781	0,3954
	1,40	0,2451	0,2613	0,2775	0,2937	0,3100	0,3264	0,3429	0,3596	0,3766	0,3938
	1,45	0,2433	0,2596	0,2759	0,2921	0,3084	0,3248	0,3414	0,3581	0,3751	0,3924
	1,50	0,2417	0,2580	0,2743	0,2906	0,3070	0,3234	0,3400	0,3567	0,3737	0,3910
0,15	1,00	0,2774	0,2937	0,3100	0,3264	0,3428	0,3593	0,3760	0,3929	0,4100	0,4276
	1,05	0,2723	0,2888	0,3053	0,3218	0,3384	0,3550	0,3718	0,3887	0,4060	0,4235
	1,10	0,2674	0,2842	0,3009	0,3175	0,3342	0,3510	0,3678	0,3849	0,4022	0,4198
	1,15	0,2628	0,2798	0,2967	0,3135	0,3303	0,3472	0,3641	0,3813	0,3986	0,4163
	1,20	0,2584	0,2757	0,2928	0,3097	0,3267	0,3436	0,3607	0,3779	0,3953	0,4131
	1,25	0,2541	0,2717	0,2890	0,3062	0,3232	0,3403	0,3575	0,3747	0,3922	0,4100
	1,30	0,2499	0,2679	0,2854	0,3028	0,3200	0,3372	0,3544	0,3718	0,3893	0,4072
	1,35	0,2459	0,2642	0,2820	0,2995	0,3169	0,3342	0,3515	0,3690	0,3866	0,4045
	1,40	0,2419	0,2607	0,2788	0,2965	0,3140	0,3314	0,3488	0,3664	0,3841	0,4020
	1,45	0,2380	0,2573	0,2756	0,2935	0,3112	0,3287	0,3463	0,3639	0,3816	0,3996
	1,50	0,2341	0,2539	0,2726	0,2907	0,3085	0,3262	0,3438	0,3615	0,3793	0,3974
0,2	1,00	0,2948	0,3114	0,3280	0,3446	0,3612	0,3779	0,3948	0,4118	0,4292	0,4470
	1,05	0,2876	0,3046	0,3215	0,3383	0,3552	0,3721	0,3891	0,4063	0,4238	0,4417
	1,10	0,2806	0,2980	0,3153	0,3324	0,3494	0,3665	0,3837	0,4011	0,4187	0,4367
	1,15	0,2736	0,2916	0,3092	0,3267	0,3440	0,3613	0,3786	0,3961	0,4139	0,4319
	1,20	0,2665	0,2853	0,3034	0,3212	0,3387	0,3563	0,3738	0,3915	0,4093	0,4275
	1,25	0,2593	0,2790	0,2977	0,3158	0,3337	0,3515	0,3692	0,3870	0,4050	0,4233
	1,30	0,2517	0,2726	0,2920	0,3107	0,3289	0,3469	0,3649	0,3828	0,4009	0,4193
	1,35	0,2434	0,2662	0,2865	0,3056	0,3242	0,3425	0,3607	0,3788	0,3971	0,4156
	1,40	0,2334	0,2594	0,2809	0,3007	0,3197	0,3383	0,3567	0,3750	0,3934	0,4120
	1,45		0,2522	0,2752	0,2958	0,3153	0,3342	0,3528	0,3713	0,3899	0,4086
	1,50		0,2439	0,2694	0,2909	0,3110	0,3302	0,3491	0,3678	0,3865	0,4054
0,25	1,00	0,3159	0,3323	0,3488	0,3653	0,3818	0,3985	0,4153	0,4323	0,4497	0,4678
	1,05	0,3071	0,3241	0,3409	0,3577	0,3745	0,3914	0,4084	0,4256	0,4432	0,4613
	1,10	0,2983	0,3159	0,3332	0,3503	0,3675	0,3846	0,4018	0,4193	0,4370	0,4552
	1,15	0,2893	0,3077	0,3255	0,3431	0,3606	0,3780	0,3955	0,4132	0,4310	0,4494
	1,20	0,2798	0,2993	0,3179	0,3360	0,3539	0,3717	0,3894	0,4073	0,4254	0,4439
	1,25	0,2692	0,2906	0,3102	0,3290	0,3474	0,3655	0,3836	0,4017	0,4199	0,4386
	1,30	0,2562	0,2812	0,3023	0,3220	0,3409	0,3595	0,3779	0,3962	0,4147	0,4335
	1,35	0,2137	0,2704	0,2940	0,3148	0,3345	0,3536	0,3723	0,3910	0,4097	0,4287
	1,40		0,2556	0,2849	0,3075	0,3281	0,3477	0,3669	0,3859	0,4049	0,4240
	1,45			0,2743	0,2998	0,3216	0,3420	0,3616	0,3810	0,4002	0,4196
	1,50			0,2587	0,2914	0,3149	0,3362	0,3564	0,3761	0,3957	0,4153
0,3	1,00	0,3390	0,3551	0,3712	0,3874	0,4037	0,4200	0,4366	0,4535	0,4708	0,4839
	1,05	0,3295	0,3460	0,3625	0,3790	0,3955	0,4121	0,4289	0,4460	0,4635	0,4808
	1,10	0,3198	0,3369	0,3538	0,3707	0,3875	0,4044	0,4215	0,4388	0,4564	0,4749
	1,15	0,3097	0,3276	0,3451	0,3624	0,3797	0,3969	0,4143	0,4318	0,4497	0,4682
	1,20	0,2989	0,3179	0,3362	0,3542	0,3719	0,3895	0,4072	0,4250	0,4431	0,4617
	1,25	0,2865	0,3076	0,3271	0,3458	0,3641	0,3822	0,4003	0,4184	0,4367	0,4555
	1,30	0,2696	0,2959	0,3174	0,3373	0,3563	0,3750	0,3935	0,4119	0,4305	0,4496
	1,35	0,2506	0,2809	0,3066	0,3283	0,3484	0,3677	0,3867	0,4056	0,4245	0,4438
	1,40	0,2395	0,2521	0,2936	0,3186	0,3402	0,3604	0,3800	0,3993	0,4186	0,4381
	1,45		0,2380	0,2538	0,3074	0,3314	0,3529	0,3733	0,3932	0,4128	0,4326
	1,50			0,2356	0,2925	0,3219	0,3452	0,3665	0,3870	0,4072	0,4273

μ_{lu} pour S 500 B ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 24

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2614	0,2757	0,2902	0,3050	0,3199	0,3350	0,3504	0,3661	0,3821	0,3984
0,05	1,00	0,2674	0,2825	0,2977	0,3131	0,3286	0,3444	0,3604	0,3766	0,3931	0,4100
	1,05	0,2662	0,2813	0,2965	0,3119	0,3275	0,3433	0,3593	0,3755	0,3920	0,4089
	1,10	0,2652	0,2803	0,2955	0,3109	0,3265	0,3422	0,3582	0,3745	0,3910	0,4079
	1,15	0,2642	0,2793	0,2945	0,3099	0,3255	0,3413	0,3573	0,3736	0,3901	0,4070
	1,20	0,2633	0,2784	0,2937	0,3091	0,3247	0,3404	0,3565	0,3727	0,3892	0,4061
	1,25	0,2625	0,2776	0,2928	0,3083	0,3239	0,3397	0,3557	0,3719	0,3885	0,4054
	1,30	0,2617	0,2768	0,2921	0,3075	0,3231	0,3389	0,3549	0,3712	0,3877	0,4046
	1,35	0,2610	0,2761	0,2914	0,3068	0,3224	0,3382	0,3542	0,3705	0,3871	0,4040
	1,40	0,2604	0,2755	0,2907	0,3062	0,3218	0,3376	0,3536	0,3699	0,3864	0,4033
	1,45	0,2597	0,2749	0,2901	0,3056	0,3212	0,3370	0,3530	0,3693	0,3858	0,4028
	1,50	0,2592	0,2743	0,2896	0,3050	0,3206	0,3364	0,3525	0,3687	0,3853	0,4022
0,1	1,00	0,2756	0,2915	0,3074	0,3235	0,3396	0,3559	0,3724	0,3892	0,4062	0,4236
	1,05	0,2729	0,2889	0,3049	0,3209	0,3371	0,3535	0,3700	0,3868	0,4038	0,4213
	1,10	0,2705	0,2864	0,3025	0,3186	0,3349	0,3513	0,3678	0,3846	0,4017	0,4191
	1,15	0,2682	0,2842	0,3003	0,3165	0,3328	0,3492	0,3658	0,3826	0,3997	0,4172
	1,20	0,2660	0,2821	0,2983	0,3145	0,3308	0,3473	0,3639	0,3808	0,3979	0,4154
	1,25	0,2640	0,2802	0,2964	0,3127	0,3290	0,3455	0,3622	0,3791	0,3962	0,4137
	1,30	0,2621	0,2784	0,2946	0,3109	0,3273	0,3439	0,3606	0,3775	0,3946	0,4121
	1,35	0,2604	0,2767	0,2930	0,3093	0,3258	0,3423	0,3590	0,3760	0,3931	0,4107
	1,40	0,2587	0,2751	0,2914	0,3078	0,3243	0,3409	0,3576	0,3746	0,3918	0,4093
	1,45	0,2572	0,2736	0,2900	0,3064	0,3229	0,3395	0,3563	0,3733	0,3905	0,4080
	1,50	0,2557	0,2722	0,2886	0,3051	0,3216	0,3383	0,3551	0,3720	0,3893	0,4068
0,15	1,00	0,2869	0,3035	0,3200	0,3366	0,3532	0,3699	0,3868	0,4039	0,4213	0,4391
	1,05	0,2824	0,2991	0,3158	0,3325	0,3492	0,3661	0,3830	0,4002	0,4177	0,4355
	1,10	0,2781	0,2950	0,3119	0,3287	0,3455	0,3625	0,3795	0,3968	0,4143	0,4322
	1,15	0,2740	0,2912	0,3082	0,3251	0,3421	0,3591	0,3763	0,3936	0,4112	0,4291
	1,20	0,2701	0,2875	0,3047	0,3218	0,3389	0,3560	0,3732	0,3906	0,4083	0,4263
	1,25	0,2664	0,2840	0,3014	0,3186	0,3358	0,3531	0,3704	0,3878	0,4055	0,4236
	1,30	0,2628	0,2807	0,2983	0,3157	0,3330	0,3503	0,3677	0,3852	0,4030	0,4211
	1,35	0,2594	0,2775	0,2953	0,3128	0,3303	0,3477	0,3652	0,3828	0,4006	0,4187
	1,40	0,2561	0,2745	0,2925	0,3102	0,3277	0,3452	0,3628	0,3805	0,3984	0,4165
	1,45	0,2528	0,2716	0,2898	0,3076	0,3253	0,3429	0,3606	0,3783	0,3962	0,4145
	1,50	0,2497	0,2688	0,2872	0,3052	0,3230	0,3407	0,3584	0,3762	0,3942	0,4125
0,2	1,00	0,3020	0,3189	0,3357	0,3525	0,3694	0,3863	0,4034	0,4206	0,4382	0,4564
	1,05	0,2955	0,3128	0,3299	0,3469	0,3639	0,3810	0,3982	0,4157	0,4334	0,4516
	1,10	0,2891	0,3068	0,3243	0,3415	0,3588	0,3761	0,3934	0,4110	0,4288	0,4471
	1,15	0,2829	0,3011	0,3189	0,3364	0,3539	0,3714	0,3889	0,4066	0,4245	0,4429
	1,20	0,2767	0,2954	0,3136	0,3315	0,3493	0,3669	0,3846	0,4025	0,4205	0,4390
	1,25	0,2704	0,2899	0,3086	0,3268	0,3448	0,3627	0,3806	0,3985	0,4167	0,4353
	1,30	0,2640	0,2844	0,3037	0,3223	0,3406	0,3587	0,3767	0,3948	0,4131	0,4318
	1,35	0,2574	0,2790	0,2989	0,3179	0,3365	0,3548	0,3730	0,3913	0,4097	0,4284
	1,40	0,2502	0,2735	0,2941	0,3136	0,3325	0,3511	0,3695	0,3879	0,4065	0,4253
	1,45	0,2419	0,2678	0,2894	0,3095	0,3287	0,3476	0,3662	0,3848	0,4034	0,4223
	1,50	0,2308	0,2619	0,2847	0,3054	0,3250	0,3441	0,3630	0,3817	0,4005	0,4195
0,25	1,00	0,3208	0,3376	0,3543	0,3710	0,3878	0,4046	0,4216	0,4389	0,4565	0,4750
	1,05	0,3126	0,3299	0,3470	0,3640	0,3811	0,3982	0,4154	0,4328	0,4506	0,4691
	1,10	0,3044	0,3223	0,3399	0,3573	0,3746	0,3920	0,4094	0,4271	0,4450	0,4636
	1,15	0,2961	0,3147	0,3329	0,3507	0,3684	0,3861	0,4037	0,4216	0,4397	0,4584
	1,20	0,2873	0,3071	0,3260	0,3443	0,3624	0,3803	0,3983	0,4163	0,4346	0,4534
	1,25	0,2779	0,2992	0,3190	0,3380	0,3565	0,3748	0,3930	0,4113	0,4298	0,4487
	1,30	0,2668	0,2910	0,3120	0,3317	0,3507	0,3694	0,3879	0,4065	0,4251	0,4442
	1,35	0,2501	0,2818	0,3047	0,3254	0,3451	0,3642	0,3830	0,4018	0,4207	0,4399
	1,40		0,2709	0,2971	0,3190	0,3394	0,3591	0,3783	0,3973	0,4164	0,4358
	1,45		0,2524	0,2887	0,3125	0,3338	0,3540	0,3736	0,3930	0,4123	0,4319
	1,50			0,2789	0,3057	0,3282	0,3491	0,3691	0,3888	0,4084	0,4281
0,3	1,00	0,3419	0,3583	0,3747	0,3911	0,4076	0,4241	0,4409	0,4579	0,4755	0,4860
	1,05	0,3329	0,3497	0,3665	0,3832	0,4000	0,4168	0,4338	0,4511	0,4688	0,4832
	1,10	0,3236	0,3411	0,3583	0,3755	0,3926	0,4097	0,4270	0,4445	0,4624	0,4805
	1,15	0,3139	0,3323	0,3502	0,3678	0,3853	0,4028	0,4204	0,4381	0,4563	0,4752
	1,20	0,3035	0,3231	0,3419	0,3602	0,3782	0,3961	0,4140	0,4320	0,4503	0,4694
	1,25	0,2915	0,3134	0,3334	0,3525	0,3711	0,3894	0,4077	0,4260	0,4446	0,4638
	1,30	0,2750	0,3024	0,3244	0,3446	0,3639	0,3828	0,4015	0,4202	0,4390	0,4584
	1,35	0,2498	0,2887	0,3146	0,3364	0,3567	0,3763	0,3955	0,4145	0,4336	0,4532
	1,40		0,2514	0,3031	0,3278	0,3494	0,3697	0,3895	0,4089	0,4284	0,4482
	1,45			0,2864	0,3181	0,3417	0,3631	0,3835	0,4034	0,4233	0,4433
	1,50				0,3065	0,3335	0,3563	0,3776	0,3980	0,4182	0,4386

μ_{lu} pour S 500 B ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 27

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2728	0,2874	0,3022	0,3172	0,3324	0,3478	0,3634	0,3794	0,3956	0,4123
0,05	1,00	0,2781	0,2934	0,3089	0,3245	0,3402	0,3562	0,3724	0,3888	0,4056	0,4227
	1,05	0,2771	0,2924	0,3078	0,3234	0,3392	0,3552	0,3714	0,3878	0,4046	0,4218
	1,10	0,2761	0,2914	0,3069	0,3225	0,3383	0,3543	0,3705	0,3869	0,4037	0,4209
	1,15	0,2752	0,2906	0,3060	0,3216	0,3374	0,3534	0,3696	0,3861	0,4029	0,4200
	1,20	0,2744	0,2898	0,3052	0,3209	0,3367	0,3527	0,3689	0,3853	0,4021	0,4193
	1,25	0,2737	0,2890	0,3045	0,3201	0,3359	0,3519	0,3682	0,3846	0,4014	0,4186
	1,30	0,2730	0,2883	0,3038	0,3195	0,3353	0,3513	0,3675	0,3840	0,4008	0,4179
	1,35	0,2724	0,2877	0,3032	0,3188	0,3347	0,3507	0,3669	0,3834	0,4002	0,4173
	1,40	0,2718	0,2871	0,3026	0,3183	0,3341	0,3501	0,3663	0,3828	0,3996	0,4168
	1,45	0,2712	0,2866	0,3021	0,3177	0,3335	0,3496	0,3658	0,3823	0,3991	0,4162
	1,50	0,2707	0,2861	0,3016	0,3172	0,3330	0,3491	0,3653	0,3818	0,3986	0,4158
0,1	1,00	0,2854	0,3014	0,3175	0,3337	0,3500	0,3665	0,3832	0,4001	0,4173	0,4349
	1,05	0,2830	0,2991	0,3152	0,3315	0,3478	0,3643	0,3810	0,3980	0,4152	0,4328
	1,10	0,2807	0,2969	0,3131	0,3294	0,3458	0,3623	0,3791	0,3960	0,4133	0,4309
	1,15	0,2787	0,2949	0,3111	0,3275	0,3439	0,3605	0,3772	0,3942	0,4115	0,4292
	1,20	0,2768	0,2930	0,3093	0,3257	0,3422	0,3588	0,3756	0,3926	0,4099	0,4276
	1,25	0,2750	0,2913	0,3076	0,3240	0,3405	0,3572	0,3740	0,3910	0,4084	0,4261
	1,30	0,2733	0,2897	0,3061	0,3225	0,3390	0,3557	0,3726	0,3896	0,4069	0,4247
	1,35	0,2718	0,2882	0,3046	0,3211	0,3376	0,3543	0,3712	0,3883	0,4056	0,4234
	1,40	0,2703	0,2868	0,3032	0,3197	0,3363	0,3531	0,3699	0,3870	0,4044	0,4222
	1,45	0,2689	0,2854	0,3019	0,3185	0,3351	0,3519	0,3688	0,3859	0,4033	0,4210
	1,50	0,2676	0,2842	0,3007	0,3173	0,3339	0,3507	0,3677	0,3848	0,4022	0,4200
0,15	1,00	0,2953	0,3120	0,3287	0,3453	0,3621	0,3789	0,3960	0,4132	0,4307	0,4488
	1,05	0,2912	0,3081	0,3249	0,3417	0,3585	0,3755	0,3926	0,4099	0,4275	0,4456
	1,10	0,2873	0,3044	0,3213	0,3382	0,3552	0,3723	0,3894	0,4068	0,4245	0,4426
	1,15	0,2837	0,3009	0,3180	0,3351	0,3521	0,3693	0,3865	0,4040	0,4217	0,4399
	1,20	0,2802	0,2976	0,3149	0,3321	0,3492	0,3665	0,3838	0,4013	0,4191	0,4373
	1,25	0,2770	0,2946	0,3120	0,3293	0,3465	0,3638	0,3813	0,3988	0,4167	0,4349
	1,30	0,2738	0,2916	0,3092	0,3266	0,3440	0,3614	0,3789	0,3965	0,4144	0,4327
	1,35	0,2708	0,2889	0,3066	0,3241	0,3416	0,3591	0,3766	0,3943	0,4123	0,4306
	1,40	0,2680	0,2862	0,3041	0,3218	0,3393	0,3569	0,3745	0,3923	0,4103	0,4287
	1,45	0,2652	0,2837	0,3017	0,3195	0,3372	0,3548	0,3725	0,3904	0,4084	0,4268
	1,50	0,2626	0,2813	0,2995	0,3174	0,3352	0,3529	0,3707	0,3886	0,4066	0,4251
0,2	1,00	0,3086	0,3256	0,3426	0,3595	0,3765	0,3935	0,4107	0,4281	0,4459	0,4643
	1,05	0,3026	0,3200	0,3372	0,3544	0,3716	0,3888	0,4061	0,4236	0,4415	0,4600
	1,10	0,2968	0,3146	0,3321	0,3496	0,3669	0,3843	0,4018	0,4194	0,4374	0,4559
	1,15	0,2912	0,3094	0,3273	0,3449	0,3625	0,3801	0,3977	0,4155	0,4336	0,4522
	1,20	0,2857	0,3044	0,3226	0,3405	0,3583	0,3761	0,3939	0,4118	0,4300	0,4486
	1,25	0,2802	0,2995	0,3181	0,3363	0,3544	0,3723	0,3902	0,4083	0,4266	0,4453
	1,30	0,2747	0,2947	0,3138	0,3323	0,3506	0,3687	0,3868	0,4050	0,4234	0,4422
	1,35	0,2691	0,2900	0,3095	0,3284	0,3469	0,3653	0,3835	0,4019	0,4204	0,4393
	1,40	0,2634	0,2853	0,3054	0,3247	0,3435	0,3620	0,3804	0,3989	0,4175	0,4365
	1,45	0,2573	0,2806	0,3014	0,3211	0,3401	0,3589	0,3775	0,3961	0,4148	0,4338
	1,50	0,2507	0,2759	0,2975	0,3176	0,3369	0,3559	0,3746	0,3934	0,4122	0,4313
0,25	1,00	0,3253	0,3423	0,3592	0,3761	0,3930	0,4100	0,4271	0,4445	0,4624	0,4805
	1,05	0,3177	0,3352	0,3525	0,3697	0,3869	0,4041	0,4215	0,4390	0,4570	0,4758
	1,10	0,3101	0,3282	0,3459	0,3635	0,3810	0,3985	0,4160	0,4338	0,4519	0,4708
	1,15	0,3024	0,3212	0,3395	0,3575	0,3753	0,3931	0,4109	0,4288	0,4471	0,4660
	1,20	0,2944	0,3143	0,3332	0,3517	0,3698	0,3879	0,4059	0,4241	0,4425	0,4616
	1,25	0,2860	0,3072	0,3269	0,3459	0,3645	0,3829	0,4012	0,4196	0,4382	0,4573
	1,30	0,2765	0,2998	0,3207	0,3403	0,3593	0,3781	0,3966	0,4152	0,4340	0,4533
	1,35	0,2645	0,2921	0,3143	0,3347	0,3543	0,3734	0,3923	0,4111	0,4301	0,4495
	1,40		0,2834	0,3077	0,3292	0,3493	0,3688	0,3880	0,4071	0,4263	0,4458
	1,45		0,2727	0,3008	0,3236	0,3444	0,3644	0,3839	0,4033	0,4226	0,4423
	1,50			0,2934	0,3179	0,3396	0,3601	0,3800	0,3996	0,4191	0,4390
0,3	1,00	0,3447	0,3613	0,3779	0,3944	0,4111	0,4278	0,4446	0,4618	0,4796	0,4878
	1,05	0,3360	0,3532	0,3702	0,3871	0,4040	0,4210	0,4381	0,4555	0,4735	0,4852
	1,10	0,3272	0,3450	0,3625	0,3799	0,3971	0,4144	0,4319	0,4495	0,4676	0,4828
	1,15	0,3180	0,3367	0,3549	0,3727	0,3904	0,4081	0,4258	0,4437	0,4620	0,4805
	1,20	0,3081	0,3281	0,3472	0,3656	0,3838	0,4019	0,4199	0,4381	0,4566	0,4760
	1,25	0,2967	0,3190	0,3393	0,3585	0,3773	0,3958	0,4142	0,4326	0,4514	0,4709
	1,30	0,2815	0,3089	0,3310	0,3513	0,3708	0,3898	0,4086	0,4274	0,4464	0,4660
	1,35	0,2486	0,2967	0,3222	0,3440	0,3643	0,3839	0,4031	0,4222	0,4415	0,4613
	1,40		0,2504	0,3122	0,3362	0,3577	0,3780	0,3977	0,4172	0,4368	0,4568
	1,45			0,2994	0,3279	0,3509	0,3721	0,3924	0,4124	0,4322	0,4524
	1,50				0,3184	0,3439	0,3662	0,3872	0,4076	0,4278	0,4482

μ_{lu} pour S 500 B ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 6

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1369	0,1461	0,1554	0,1650	0,1749	0,1849	0,1952	0,2057	0,2165	0,2274
0,05	1,00	0,1523	0,1630	0,1739	0,1850	0,1962	0,2076	0,2192	0,2310	0,2430	0,2552
	1,05	0,1495	0,1603	0,1712	0,1823	0,1935	0,2049	0,2165	0,2283	0,2402	0,2524
	1,10	0,1470	0,1578	0,1687	0,1798	0,1910	0,2024	0,2140	0,2258	0,2377	0,2499
	1,15	0,1446	0,1554	0,1664	0,1775	0,1887	0,2001	0,2117	0,2235	0,2354	0,2476
	1,20	0,1424	0,1532	0,1642	0,1753	0,1866	0,1980	0,2096	0,2213	0,2333	0,2455
	1,25	0,1403	0,1512	0,1622	0,1733	0,1846	0,1960	0,2076	0,2194	0,2313	0,2435
	1,30	0,1383	0,1493	0,1603	0,1715	0,1827	0,1942	0,2058	0,2175	0,2295	0,2416
	1,35	0,1365	0,1475	0,1586	0,1697	0,1810	0,1924	0,2040	0,2158	0,2278	0,2399
	1,40	0,1347	0,1458	0,1569	0,1681	0,1794	0,1908	0,2024	0,2142	0,2262	0,2383
	1,45	0,1331	0,1442	0,1553	0,1665	0,1779	0,1893	0,2009	0,2127	0,2247	0,2368
	1,50	0,1315	0,1427	0,1539	0,1651	0,1764	0,1879	0,1995	0,2113	0,2232	0,2354
0,1	1,00	0,1787	0,1906	0,2026	0,2147	0,2270	0,2394	0,2520	0,2647	0,2776	0,2908
	1,05	0,1725	0,1846	0,1967	0,2089	0,2212	0,2336	0,2462	0,2590	0,2719	0,2851
	1,10	0,1665	0,1788	0,1910	0,2033	0,2157	0,2282	0,2409	0,2537	0,2666	0,2798
	1,15	0,1606	0,1731	0,1856	0,1981	0,2105	0,2231	0,2358	0,2487	0,2616	0,2748
	1,20	0,1546	0,1676	0,1804	0,1930	0,2056	0,2183	0,2311	0,2439	0,2570	0,2702
	1,25	0,1486	0,1622	0,1752	0,1881	0,2009	0,2137	0,2266	0,2395	0,2526	0,2658
	1,30	0,1422	0,1567	0,1702	0,1834	0,1964	0,2093	0,2223	0,2353	0,2484	0,2617
	1,35	0,1352	0,1511	0,1652	0,1788	0,1920	0,2051	0,2182	0,2313	0,2445	0,2578
	1,40	0,1261	0,1451	0,1602	0,1742	0,1878	0,2011	0,2143	0,2275	0,2408	0,2541
	1,45		0,1385	0,1551	0,1697	0,1836	0,1971	0,2105	0,2238	0,2372	0,2506
	1,50		0,1299	0,1497	0,1652	0,1795	0,1933	0,2069	0,2204	0,2338	0,2473
0,15	1,00	0,2141	0,2265	0,2390	0,2517	0,2645	0,2775	0,2906	0,3040	0,3175	0,3313
	1,05	0,2054	0,2179	0,2305	0,2433	0,2562	0,2692	0,2824	0,2958	0,3093	0,3231
	1,10	0,1968	0,2095	0,2224	0,2352	0,2482	0,2613	0,2746	0,2880	0,3016	0,3154
	1,15	0,1881	0,2012	0,2143	0,2274	0,2405	0,2538	0,2671	0,2806	0,2942	0,3080
	1,20	0,1791	0,1929	0,2063	0,2197	0,2331	0,2464	0,2599	0,2735	0,2872	0,3011
	1,25	0,1693	0,1842	0,1983	0,2121	0,2257	0,2393	0,2530	0,2667	0,2805	0,2944
	1,30	0,1574	0,1747	0,1899	0,2044	0,2185	0,2324	0,2462	0,2601	0,2740	0,2881
	1,35	0,1377	0,1634	0,1810	0,1965	0,2112	0,2255	0,2396	0,2537	0,2678	0,2820
	1,40	0,1324	0,1380	0,1705	0,1880	0,2037	0,2186	0,2331	0,2475	0,2618	0,2761
	1,45	0,1236	0,1322	0,1535	0,1785	0,1959	0,2116	0,2266	0,2413	0,2559	0,2704
	1,50		0,1168	0,1320	0,1657	0,1873	0,2044	0,2201	0,2353	0,2501	0,2649
0,2	1,00	0,2521	0,2649	0,2778	0,2909	0,3042	0,3176	0,3312	0,3450	0,3590	0,3733
	1,05	0,2421	0,2549	0,2679	0,2810	0,2942	0,3076	0,3212	0,3350	0,3490	0,3633
	1,10	0,2323	0,2452	0,2582	0,2713	0,2846	0,2981	0,3117	0,3255	0,3395	0,3537
	1,15	0,2224	0,2355	0,2486	0,2619	0,2753	0,2888	0,3025	0,3163	0,3304	0,3446
	1,20	0,2123	0,2257	0,2392	0,2526	0,2662	0,2798	0,2936	0,3075	0,3216	0,3359
	1,25	0,2016	0,2157	0,2296	0,2433	0,2571	0,2710	0,2849	0,2989	0,3131	0,3275
	1,30	0,1897	0,2050	0,2196	0,2339	0,2481	0,2622	0,2763	0,2906	0,3049	0,3194
	1,35	0,1785	0,1928	0,2089	0,2241	0,2389	0,2534	0,2679	0,2823	0,2968	0,3115
	1,40	0,1741	0,1791	0,1966	0,2136	0,2293	0,2445	0,2594	0,2742	0,2889	0,3037
	1,45	0,1692	0,1745	0,1796	0,2012	0,2190	0,2352	0,2507	0,2660	0,2811	0,2961
	1,50	0,1637	0,1694	0,1749	0,1818	0,2069	0,2252	0,2418	0,2577	0,2732	0,2886
0,25	1,00	0,2892	0,3024	0,3158	0,3293	0,3430	0,3568	0,3708	0,3850	0,3995	0,4142
	1,05	0,2785	0,2917	0,3050	0,3184	0,3320	0,3458	0,3598	0,3740	0,3883	0,4030
	1,10	0,2681	0,2812	0,2945	0,3079	0,3215	0,3352	0,3492	0,3633	0,3777	0,3923
	1,15	0,2577	0,2709	0,2842	0,2976	0,3112	0,3250	0,3389	0,3531	0,3674	0,3820
	1,20	0,2473	0,2606	0,2740	0,2875	0,3011	0,3150	0,3289	0,3431	0,3575	0,3721
	1,25	0,2366	0,2501	0,2637	0,2774	0,2912	0,3051	0,3192	0,3334	0,3478	0,3625
	1,30	0,2254	0,2394	0,2533	0,2673	0,2813	0,2954	0,3096	0,3239	0,3384	0,3531
	1,35	0,2168	0,2279	0,2425	0,2569	0,2712	0,2856	0,3000	0,3145	0,3292	0,3440
	1,40	0,2123	0,2175	0,2308	0,2460	0,2609	0,2757	0,2904	0,3052	0,3200	0,3350
	1,45	0,2078	0,2130	0,2183	0,2341	0,2500	0,2654	0,2807	0,2958	0,3109	0,3261
	1,50	0,2032	0,2084	0,2137	0,2198	0,2379	0,2546	0,2706	0,2862	0,3018	0,3173
0,3	1,00	0,3236	0,3373	0,3511	0,3650	0,3791	0,3933	0,4077	0,4223	0,4372	0,4524
	1,05	0,3127	0,3263	0,3400	0,3538	0,3678	0,3819	0,3962	0,4108	0,4255	0,4406
	1,10	0,3020	0,3155	0,3291	0,3429	0,3568	0,3708	0,3851	0,3996	0,4143	0,4293
	1,15	0,2915	0,3049	0,3184	0,3322	0,3460	0,3601	0,3743	0,3887	0,4034	0,4183
	1,20	0,2810	0,2944	0,3079	0,3216	0,3355	0,3495	0,3637	0,3781	0,3928	0,4077
	1,25	0,2704	0,2839	0,2975	0,3112	0,3251	0,3392	0,3534	0,3678	0,3824	0,3973
	1,30	0,2597	0,2733	0,2870	0,3008	0,3148	0,3289	0,3432	0,3577	0,3723	0,3873
	1,35	0,2524	0,2624	0,2763	0,2903	0,3045	0,3187	0,3331	0,3477	0,3624	0,3774
	1,40	0,2479	0,2534	0,2652	0,2796	0,2940	0,3084	0,3230	0,3377	0,3526	0,3676
	1,45	0,2434	0,2489	0,2544	0,2683	0,2831	0,2980	0,3128	0,3277	0,3428	0,3580
	1,50	0,2389	0,2444	0,2498	0,2560	0,2717	0,2871	0,3024	0,3176	0,3330	0,3484

μ_{lu} pour S 500 B ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 9

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1779	0,1891	0,2005	0,2121	0,2241	0,2362	0,2486	0,2612	0,2741	0,2873
0,05	1,00	0,1893	0,2018	0,2145	0,2274	0,2404	0,2536	0,2671	0,2808	0,2947	0,3088
	1,05	0,1872	0,1997	0,2124	0,2253	0,2383	0,2515	0,2650	0,2787	0,2925	0,3067
	1,10	0,1853	0,1978	0,2105	0,2233	0,2364	0,2496	0,2631	0,2767	0,2906	0,3047
	1,15	0,1835	0,1960	0,2087	0,2216	0,2346	0,2478	0,2613	0,2749	0,2888	0,3030
	1,20	0,1818	0,1943	0,2070	0,2199	0,2330	0,2462	0,2596	0,2733	0,2872	0,3013
	1,25	0,1802	0,1928	0,2055	0,2184	0,2314	0,2447	0,2581	0,2718	0,2857	0,2998
	1,30	0,1788	0,1914	0,2041	0,2170	0,2300	0,2433	0,2567	0,2704	0,2843	0,2984
	1,35	0,1774	0,1900	0,2028	0,2157	0,2287	0,2420	0,2554	0,2691	0,2830	0,2971
	1,40	0,1762	0,1888	0,2015	0,2144	0,2275	0,2408	0,2542	0,2679	0,2817	0,2959
	1,45	0,1750	0,1876	0,2004	0,2133	0,2264	0,2396	0,2531	0,2667	0,2806	0,2947
	1,50	0,1739	0,1865	0,1993	0,2122	0,2253	0,2386	0,2520	0,2657	0,2795	0,2937
0,1	1,00	0,2076	0,2212	0,2350	0,2489	0,2628	0,2770	0,2913	0,3058	0,3205	0,3354
	1,05	0,2026	0,2164	0,2302	0,2442	0,2582	0,2724	0,2867	0,3013	0,3160	0,3310
	1,10	0,1978	0,2118	0,2258	0,2398	0,2539	0,2681	0,2825	0,2971	0,3118	0,3268
	1,15	0,1933	0,2074	0,2215	0,2357	0,2499	0,2642	0,2786	0,2932	0,3080	0,3230
	1,20	0,1889	0,2033	0,2176	0,2318	0,2461	0,2605	0,2749	0,2896	0,3044	0,3194
	1,25	0,1847	0,1993	0,2138	0,2281	0,2425	0,2570	0,2715	0,2862	0,3010	0,3161
	1,30	0,1806	0,1955	0,2102	0,2247	0,2391	0,2537	0,2683	0,2830	0,2979	0,3130
	1,35	0,1766	0,1918	0,2067	0,2214	0,2360	0,2506	0,2652	0,2800	0,2949	0,3101
	1,40	0,1726	0,1883	0,2034	0,2182	0,2329	0,2476	0,2624	0,2772	0,2922	0,3073
	1,45	0,1686	0,1848	0,2002	0,2152	0,2300	0,2448	0,2596	0,2745	0,2895	0,3047
	1,50	0,1646	0,1814	0,1971	0,2123	0,2273	0,2422	0,2571	0,2720	0,2871	0,3023
0,15	1,00	0,2334	0,2477	0,2620	0,2764	0,2909	0,3056	0,3204	0,3354	0,3507	0,3661
	1,05	0,2256	0,2402	0,2547	0,2692	0,2839	0,2987	0,3136	0,3287	0,3440	0,3595
	1,10	0,2180	0,2329	0,2476	0,2624	0,2772	0,2921	0,3071	0,3223	0,3377	0,3532
	1,15	0,2103	0,2257	0,2408	0,2558	0,2708	0,2859	0,3010	0,3163	0,3317	0,3474
	1,20	0,2025	0,2186	0,2341	0,2495	0,2647	0,2799	0,2952	0,3106	0,3261	0,3418
	1,25	0,1943	0,2114	0,2275	0,2433	0,2588	0,2742	0,2897	0,3052	0,3208	0,3366
	1,30	0,1852	0,2039	0,2209	0,2372	0,2530	0,2687	0,2844	0,3000	0,3158	0,3316
	1,35	0,1736	0,1960	0,2142	0,2311	0,2474	0,2634	0,2792	0,2951	0,3109	0,3269
	1,40		0,1869	0,2072	0,2251	0,2419	0,2582	0,2743	0,2903	0,3063	0,3224
	1,45		0,1744	0,1998	0,2189	0,2364	0,2531	0,2695	0,2857	0,3019	0,3181
	1,50			0,1912	0,2125	0,2309	0,2482	0,2649	0,2813	0,2977	0,3140
0,2	1,00	0,2643	0,2787	0,2932	0,3078	0,3225	0,3374	0,3525	0,3678	0,3833	0,3991
	1,05	0,2547	0,2694	0,2840	0,2988	0,3137	0,3287	0,3439	0,3593	0,3749	0,3907
	1,10	0,2452	0,2602	0,2751	0,2901	0,3052	0,3203	0,3356	0,3511	0,3668	0,3827
	1,15	0,2355	0,2510	0,2663	0,2816	0,2969	0,3123	0,3277	0,3433	0,3591	0,3751
	1,20	0,2252	0,2416	0,2575	0,2732	0,2888	0,3044	0,3201	0,3358	0,3518	0,3679
	1,25	0,2140	0,2318	0,2485	0,2648	0,2808	0,2968	0,3127	0,3286	0,3447	0,3609
	1,30	0,1998	0,2210	0,2392	0,2563	0,2729	0,2892	0,3054	0,3216	0,3379	0,3543
	1,35	0,1780	0,2078	0,2290	0,2475	0,2649	0,2817	0,2983	0,3148	0,3313	0,3479
	1,40	0,1710	0,1787	0,2171	0,2381	0,2566	0,2742	0,2913	0,3081	0,3249	0,3416
	1,45		0,1708	0,1973	0,2274	0,2480	0,2666	0,2843	0,3015	0,3186	0,3356
	1,50			0,1703	0,2133	0,2385	0,2586	0,2772	0,2950	0,3124	0,3297
0,25	1,00	0,2966	0,3110	0,3256	0,3403	0,3551	0,3701	0,3853	0,4007	0,4164	0,4325
	1,05	0,2862	0,3007	0,3154	0,3302	0,3452	0,3603	0,3755	0,3910	0,4068	0,4229
	1,10	0,2758	0,2906	0,3054	0,3204	0,3355	0,3507	0,3661	0,3817	0,3975	0,4136
	1,15	0,2652	0,2804	0,2955	0,3107	0,3260	0,3414	0,3569	0,3726	0,3886	0,4048
	1,20	0,2543	0,2700	0,2856	0,3011	0,3166	0,3323	0,3480	0,3639	0,3799	0,3962
	1,25	0,2424	0,2591	0,2754	0,2914	0,3073	0,3233	0,3392	0,3553	0,3715	0,3880
	1,30	0,2286	0,2473	0,2647	0,2815	0,2979	0,3143	0,3306	0,3469	0,3634	0,3800
	1,35	0,2164	0,2333	0,2530	0,2711	0,2883	0,3052	0,3220	0,3386	0,3553	0,3722
	1,40	0,2109	0,2173	0,2391	0,2597	0,2783	0,2960	0,3133	0,3304	0,3474	0,3645
	1,45	0,2045	0,2115	0,2182	0,2462	0,2674	0,2864	0,3045	0,3222	0,3396	0,3570
	1,50	0,1954	0,2045	0,2121	0,2232	0,2546	0,2760	0,2954	0,3138	0,3318	0,3496
0,3	1,00	0,3279	0,3424	0,3570	0,3718	0,3867	0,4018	0,4170	0,4325	0,4484	0,4647
	1,05	0,3172	0,3317	0,3464	0,3612	0,3762	0,3913	0,4066	0,4222	0,4381	0,4544
	1,10	0,3065	0,3212	0,3360	0,3509	0,3659	0,3812	0,3965	0,4122	0,4281	0,4444
	1,15	0,2958	0,3107	0,3256	0,3407	0,3559	0,3712	0,3867	0,4024	0,4184	0,4347
	1,20	0,2848	0,3000	0,3152	0,3305	0,3459	0,3614	0,3770	0,3929	0,4090	0,4254
	1,25	0,2734	0,2890	0,3047	0,3203	0,3359	0,3516	0,3675	0,3835	0,3997	0,4163
	1,30	0,2608	0,2774	0,2937	0,3098	0,3258	0,3419	0,3580	0,3743	0,3907	0,4074
	1,35	0,2521	0,2646	0,2820	0,2989	0,3156	0,3321	0,3485	0,3651	0,3817	0,3986
	1,40	0,2469	0,2532	0,2690	0,2873	0,3048	0,3220	0,3390	0,3559	0,3729	0,3900
	1,45	0,2415	0,2479	0,2543	0,2741	0,2933	0,3115	0,3292	0,3466	0,3640	0,3814
	1,50	0,2356	0,2423	0,2489	0,2568	0,2801	0,3002	0,3189	0,3371	0,3550	0,3729

μ_{lu} pour S 500 B ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 12

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2085	0,2210	0,2337	0,2467	0,2599	0,2734	0,2871	0,3010	0,3153	0,3298
0,05	1,00	0,2177	0,2313	0,2451	0,2590	0,2732	0,2875	0,3021	0,3169	0,3320	0,3473
	1,05	0,2159	0,2296	0,2433	0,2573	0,2715	0,2858	0,3004	0,3152	0,3303	0,3456
	1,10	0,2144	0,2280	0,2418	0,2557	0,2699	0,2843	0,2988	0,3137	0,3287	0,3440
	1,15	0,2129	0,2265	0,2403	0,2543	0,2685	0,2828	0,2974	0,3122	0,3273	0,3426
	1,20	0,2115	0,2252	0,2390	0,2530	0,2671	0,2815	0,2961	0,3109	0,3260	0,3413
	1,25	0,2103	0,2239	0,2378	0,2517	0,2659	0,2803	0,2949	0,3097	0,3247	0,3401
	1,30	0,2091	0,2228	0,2366	0,2506	0,2648	0,2792	0,2937	0,3085	0,3236	0,3389
	1,35	0,2081	0,2217	0,2355	0,2495	0,2637	0,2781	0,2927	0,3075	0,3226	0,3379
	1,40	0,2070	0,2207	0,2346	0,2486	0,2627	0,2771	0,2917	0,3065	0,3216	0,3369
	1,45	0,2061	0,2198	0,2336	0,2476	0,2618	0,2762	0,2908	0,3056	0,3207	0,3360
	1,50	0,2052	0,2189	0,2328	0,2468	0,2610	0,2753	0,2899	0,3047	0,3198	0,3351
0,1	1,00	0,2315	0,2461	0,2609	0,2758	0,2908	0,3059	0,3212	0,3367	0,3525	0,3685
	1,05	0,2274	0,2422	0,2570	0,2719	0,2870	0,3022	0,3175	0,3331	0,3488	0,3649
	1,10	0,2235	0,2384	0,2534	0,2684	0,2835	0,2987	0,3141	0,3297	0,3455	0,3616
	1,15	0,2199	0,2350	0,2500	0,2651	0,2802	0,2955	0,3109	0,3266	0,3424	0,3585
	1,20	0,2165	0,2317	0,2468	0,2620	0,2772	0,2925	0,3080	0,3237	0,3395	0,3556
	1,25	0,2133	0,2286	0,2438	0,2591	0,2743	0,2897	0,3053	0,3209	0,3368	0,3530
	1,30	0,2102	0,2257	0,2410	0,2563	0,2717	0,2871	0,3027	0,3184	0,3343	0,3505
	1,35	0,2073	0,2229	0,2384	0,2538	0,2692	0,2847	0,3003	0,3160	0,3320	0,3482
	1,40	0,2045	0,2203	0,2358	0,2513	0,2668	0,2824	0,2980	0,3138	0,3298	0,3460
	1,45	0,2018	0,2178	0,2335	0,2490	0,2646	0,2802	0,2959	0,3117	0,3277	0,3439
	1,50	0,1992	0,2154	0,2312	0,2469	0,2625	0,2781	0,2939	0,3097	0,3258	0,3420
0,15	1,00	0,2511	0,2665	0,2818	0,2973	0,3128	0,3284	0,3442	0,3602	0,3764	0,3929
	1,05	0,2444	0,2600	0,2756	0,2912	0,3069	0,3226	0,3385	0,3546	0,3709	0,3875
	1,10	0,2379	0,2539	0,2697	0,2855	0,3013	0,3172	0,3332	0,3494	0,3657	0,3823
	1,15	0,2315	0,2479	0,2640	0,2800	0,2960	0,3121	0,3282	0,3444	0,3609	0,3776
	1,20	0,2252	0,2421	0,2586	0,2748	0,2910	0,3072	0,3234	0,3398	0,3563	0,3731
	1,25	0,2189	0,2364	0,2533	0,2698	0,2862	0,3026	0,3190	0,3354	0,3520	0,3689
	1,30	0,2124	0,2308	0,2481	0,2650	0,2817	0,2982	0,3147	0,3313	0,3480	0,3649
	1,35	0,2056	0,2251	0,2431	0,2604	0,2773	0,2940	0,3107	0,3274	0,3442	0,3611
	1,40	0,1982	0,2194	0,2381	0,2558	0,2730	0,2900	0,3068	0,3236	0,3405	0,3576
	1,45	0,1892	0,2134	0,2331	0,2514	0,2689	0,2861	0,3031	0,3201	0,3371	0,3542
	1,50		0,2071	0,2282	0,2470	0,2649	0,2824	0,2996	0,3167	0,3338	0,3510
0,2	1,00	0,2760	0,2915	0,3070	0,3227	0,3384	0,3542	0,3702	0,3864	0,4029	0,4197
	1,05	0,2672	0,2831	0,2989	0,3148	0,3307	0,3467	0,3628	0,3791	0,3957	0,4126
	1,10	0,2585	0,2748	0,2910	0,3071	0,3233	0,3395	0,3558	0,3722	0,3889	0,4059
	1,15	0,2496	0,2666	0,2832	0,2997	0,3161	0,3325	0,3490	0,3657	0,3825	0,3995
	1,20	0,2403	0,2583	0,2755	0,2925	0,3092	0,3259	0,3426	0,3594	0,3763	0,3935
	1,25	0,2302	0,2497	0,2678	0,2853	0,3024	0,3194	0,3364	0,3534	0,3705	0,3878
	1,30	0,2182	0,2405	0,2599	0,2781	0,2958	0,3132	0,3304	0,3476	0,3649	0,3823
	1,35	0,1771	0,2302	0,2517	0,2709	0,2892	0,3070	0,3246	0,3420	0,3595	0,3771
	1,40		0,2165	0,2428	0,2636	0,2827	0,3010	0,3189	0,3366	0,3543	0,3721
	1,45			0,2324	0,2558	0,2760	0,2950	0,3133	0,3314	0,3493	0,3673
	1,50			0,2172	0,2474	0,2692	0,2890	0,3079	0,3263	0,3445	0,3627
0,25	1,00	0,3038	0,3191	0,3346	0,3502	0,3658	0,3816	0,3976	0,4139	0,4304	0,4474
	1,05	0,2939	0,3095	0,3252	0,3410	0,3569	0,3729	0,3890	0,4054	0,4220	0,4391
	1,10	0,2839	0,3000	0,3160	0,3321	0,3482	0,3644	0,3807	0,3972	0,4140	0,4311
	1,15	0,2736	0,2903	0,3068	0,3232	0,3397	0,3561	0,3727	0,3894	0,4063	0,4236
	1,20	0,2627	0,2804	0,2976	0,3145	0,3313	0,3480	0,3648	0,3818	0,3989	0,4163
	1,25	0,2505	0,2699	0,2880	0,3057	0,3229	0,3401	0,3572	0,3744	0,3917	0,4093
	1,30	0,2348	0,2582	0,2780	0,2966	0,3146	0,3322	0,3497	0,3672	0,3848	0,4025
	1,35	0,2159	0,2435	0,2670	0,2872	0,3061	0,3244	0,3423	0,3602	0,3780	0,3960
	1,40	0,2081	0,2168	0,2537	0,2770	0,2973	0,3164	0,3350	0,3532	0,3714	0,3896
	1,45		0,2080	0,2180	0,2652	0,2880	0,3083	0,3276	0,3464	0,3649	0,3834
	1,50			0,2078	0,2486	0,2776	0,2998	0,3201	0,3395	0,3585	0,3774
0,3	1,00	0,3320	0,3472	0,3625	0,3779	0,3934	0,4091	0,4250	0,4411	0,4577	0,4749
	1,05	0,3216	0,3370	0,3525	0,3681	0,3838	0,3996	0,4157	0,4319	0,4486	0,4658
	1,10	0,3112	0,3269	0,3426	0,3584	0,3743	0,3904	0,4066	0,4230	0,4398	0,4570
	1,15	0,3006	0,3167	0,3328	0,3489	0,3650	0,3813	0,3977	0,4143	0,4312	0,4486
	1,20	0,2894	0,3062	0,3228	0,3393	0,3558	0,3724	0,3890	0,4059	0,4229	0,4404
	1,25	0,2771	0,2951	0,3125	0,3296	0,3465	0,3635	0,3804	0,3975	0,4148	0,4325
	1,30	0,2627	0,2829	0,3016	0,3196	0,3372	0,3546	0,3719	0,3893	0,4069	0,4247
	1,35	0,2517	0,2682	0,2896	0,3090	0,3275	0,3456	0,3634	0,3812	0,3991	0,4172
	1,40	0,2456	0,2529	0,2751	0,2973	0,3173	0,3363	0,3548	0,3731	0,3914	0,4098
	1,45	0,2383	0,2465	0,2542	0,2835	0,3062	0,3266	0,3461	0,3650	0,3837	0,4024
	1,50	0,2261	0,2383	0,2474	0,2603	0,2933	0,3162	0,3369	0,3567	0,3760	0,3952

μ_{lu} pour S 500 B ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 15

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2322	0,2455	0,2591	0,2730	0,2871	0,3014	0,3159	0,3307	0,3458	0,3612
0,05	1,00	0,2398	0,2541	0,2686	0,2833	0,2982	0,3133	0,3286	0,3441	0,3599	0,3760
	1,05	0,2384	0,2527	0,2672	0,2819	0,2968	0,3118	0,3271	0,3427	0,3585	0,3746
	1,10	0,2370	0,2514	0,2659	0,2806	0,2954	0,3105	0,3258	0,3414	0,3572	0,3733
	1,15	0,2358	0,2501	0,2647	0,2794	0,2942	0,3093	0,3246	0,3402	0,3560	0,3721
	1,20	0,2346	0,2490	0,2635	0,2782	0,2931	0,3082	0,3235	0,3391	0,3549	0,3710
	1,25	0,2336	0,2480	0,2625	0,2772	0,2921	0,3072	0,3225	0,3380	0,3539	0,3700
	1,30	0,2326	0,2470	0,2615	0,2763	0,2912	0,3062	0,3216	0,3371	0,3529	0,3690
	1,35	0,2317	0,2461	0,2607	0,2754	0,2903	0,3054	0,3207	0,3362	0,3520	0,3681
	1,40	0,2309	0,2453	0,2598	0,2745	0,2894	0,3045	0,3199	0,3354	0,3512	0,3673
	1,45	0,2301	0,2445	0,2590	0,2738	0,2887	0,3038	0,3191	0,3347	0,3505	0,3666
	1,50	0,2294	0,2438	0,2583	0,2730	0,2880	0,3031	0,3184	0,3339	0,3498	0,3659
0,1	1,00	0,2508	0,2661	0,2815	0,2970	0,3126	0,3283	0,3443	0,3604	0,3768	0,3935
	1,05	0,2474	0,2628	0,2782	0,2938	0,3094	0,3252	0,3412	0,3574	0,3738	0,3905
	1,10	0,2442	0,2597	0,2752	0,2908	0,3065	0,3223	0,3383	0,3546	0,3710	0,3878
	1,15	0,2412	0,2568	0,2724	0,2880	0,3038	0,3197	0,3357	0,3520	0,3684	0,3852
	1,20	0,2385	0,2541	0,2698	0,2855	0,3013	0,3172	0,3333	0,3496	0,3661	0,3828
	1,25	0,2358	0,2516	0,2673	0,2831	0,2989	0,3149	0,3310	0,3473	0,3638	0,3807
	1,30	0,2334	0,2492	0,2650	0,2808	0,2967	0,3127	0,3289	0,3452	0,3618	0,3786
	1,35	0,2310	0,2470	0,2628	0,2787	0,2947	0,3107	0,3269	0,3433	0,3598	0,3767
	1,40	0,2288	0,2449	0,2608	0,2768	0,2928	0,3088	0,3251	0,3414	0,3580	0,3749
	1,45	0,2267	0,2429	0,2589	0,2749	0,2909	0,3071	0,3233	0,3397	0,3564	0,3732
	1,50	0,2247	0,2410	0,2571	0,2731	0,2892	0,3054	0,3217	0,3381	0,3548	0,3717
0,15	1,00	0,2664	0,2824	0,2984	0,3144	0,3305	0,3468	0,3631	0,3797	0,3965	0,4137
	1,05	0,2606	0,2769	0,2931	0,3093	0,3255	0,3419	0,3583	0,3750	0,3919	0,4091
	1,10	0,2551	0,2717	0,2881	0,3044	0,3208	0,3373	0,3538	0,3706	0,3875	0,4048
	1,15	0,2498	0,2667	0,2833	0,2998	0,3164	0,3330	0,3496	0,3665	0,3835	0,4008
	1,20	0,2447	0,2619	0,2788	0,2955	0,3122	0,3289	0,3457	0,3626	0,3797	0,3971
	1,25	0,2396	0,2572	0,2744	0,2914	0,3082	0,3251	0,3420	0,3590	0,3762	0,3936
	1,30	0,2347	0,2528	0,2703	0,2875	0,3045	0,3215	0,3385	0,3556	0,3728	0,3903
	1,35	0,2297	0,2484	0,2663	0,2837	0,3009	0,3180	0,3351	0,3523	0,3697	0,3873
	1,40	0,2248	0,2441	0,2624	0,2801	0,2975	0,3148	0,3320	0,3493	0,3667	0,3843
	1,45	0,2197	0,2399	0,2586	0,2766	0,2942	0,3117	0,3290	0,3464	0,3639	0,3816
	1,50	0,2145	0,2357	0,2550	0,2733	0,2911	0,3087	0,3262	0,3437	0,3612	0,3790
0,2	1,00	0,2867	0,3029	0,3192	0,3354	0,3517	0,3681	0,3847	0,4015	0,4185	0,4359
	1,05	0,2788	0,2955	0,3120	0,3285	0,3450	0,3616	0,3783	0,3952	0,4124	0,4299
	1,10	0,2710	0,2882	0,3050	0,3218	0,3386	0,3554	0,3723	0,3893	0,4066	0,4242
	1,15	0,2632	0,2810	0,2983	0,3154	0,3324	0,3494	0,3665	0,3837	0,4011	0,4189
	1,20	0,2552	0,2738	0,2917	0,3092	0,3265	0,3438	0,3610	0,3784	0,3960	0,4138
	1,25	0,2468	0,2665	0,2851	0,3031	0,3208	0,3383	0,3558	0,3734	0,3911	0,4090
	1,30	0,2375	0,2591	0,2786	0,2972	0,3152	0,3331	0,3508	0,3685	0,3864	0,4044
	1,35	0,2262	0,2512	0,2720	0,2913	0,3098	0,3280	0,3460	0,3639	0,3819	0,4001
	1,40		0,2425	0,2652	0,2854	0,3045	0,3231	0,3413	0,3595	0,3777	0,3960
	1,45		0,2319	0,2581	0,2795	0,2993	0,3183	0,3368	0,3552	0,3736	0,3921
	1,50			0,2504	0,2735	0,2941	0,3136	0,3325	0,3511	0,3697	0,3883
0,25	1,00	0,3106	0,3266	0,3427	0,3589	0,3751	0,3914	0,4080	0,4247	0,4418	0,4594
	1,05	0,3013	0,3178	0,3342	0,3506	0,3671	0,3837	0,4004	0,4173	0,4345	0,4522
	1,10	0,2919	0,3089	0,3258	0,3426	0,3593	0,3761	0,3931	0,4102	0,4275	0,4454
	1,15	0,2822	0,3000	0,3174	0,3346	0,3518	0,3689	0,3860	0,4033	0,4209	0,4388
	1,20	0,2720	0,2909	0,3091	0,3268	0,3443	0,3618	0,3792	0,3968	0,4145	0,4326
	1,25	0,2604	0,2813	0,3005	0,3190	0,3370	0,3549	0,3726	0,3904	0,4084	0,4266
	1,30	0,2455	0,2707	0,2916	0,3111	0,3298	0,3481	0,3662	0,3843	0,4025	0,4209
	1,35	0,2150	0,2579	0,2821	0,3029	0,3225	0,3413	0,3599	0,3783	0,3967	0,4154
	1,40	0,1944	0,2162	0,2712	0,2944	0,3151	0,3346	0,3537	0,3725	0,3912	0,4100
	1,45			0,2566	0,2850	0,3074	0,3279	0,3476	0,3668	0,3858	0,4049
	1,50				0,2741	0,2993	0,3211	0,3414	0,3611	0,3805	0,3999
0,3	1,00	0,3359	0,3516	0,3674	0,3833	0,3993	0,4154	0,4317	0,4483	0,4654	0,4814
	1,05	0,3260	0,3421	0,3581	0,3743	0,3905	0,4068	0,4234	0,4401	0,4573	0,4752
	1,10	0,3159	0,3325	0,3489	0,3654	0,3819	0,3985	0,4152	0,4322	0,4495	0,4675
	1,15	0,3055	0,3227	0,3397	0,3565	0,3734	0,3903	0,4073	0,4245	0,4420	0,4601
	1,20	0,2944	0,3126	0,3302	0,3477	0,3650	0,3822	0,3995	0,4170	0,4347	0,4529
	1,25	0,2819	0,3018	0,3205	0,3387	0,3565	0,3742	0,3919	0,4097	0,4276	0,4460
	1,30	0,2657	0,2896	0,3101	0,3294	0,3480	0,3662	0,3844	0,4025	0,4207	0,4393
	1,35	0,2512	0,2741	0,2986	0,3196	0,3392	0,3582	0,3769	0,3954	0,4140	0,4328
	1,40	0,2434	0,2525	0,2844	0,3088	0,3301	0,3500	0,3693	0,3883	0,4073	0,4264
	1,45	0,2257	0,2438	0,2540	0,2961	0,3202	0,3416	0,3617	0,3813	0,4007	0,4202
	1,50			0,2443	0,2764	0,3090	0,3326	0,3539	0,3743	0,3942	0,4140

μ_{lu} pour S 500 B ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 18

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2509	0,2649	0,2791	0,2936	0,3082	0,3231	0,3382	0,3536	0,3693	0,3853
0,05	1,00	0,2575	0,2723	0,2873	0,3025	0,3178	0,3333	0,3491	0,3651	0,3814	0,3980
	1,05	0,2562	0,2711	0,2860	0,3012	0,3166	0,3321	0,3479	0,3639	0,3802	0,3968
	1,10	0,2551	0,2699	0,2849	0,3001	0,3154	0,3310	0,3468	0,3628	0,3791	0,3957
	1,15	0,2540	0,2689	0,2839	0,2990	0,3144	0,3300	0,3457	0,3617	0,3780	0,3947
	1,20	0,2530	0,2679	0,2829	0,2981	0,3134	0,3290	0,3448	0,3608	0,3771	0,3937
	1,25	0,2521	0,2670	0,2820	0,2972	0,3126	0,3281	0,3439	0,3599	0,3762	0,3929
	1,30	0,2513	0,2662	0,2812	0,2964	0,3118	0,3273	0,3431	0,3591	0,3754	0,3921
	1,35	0,2505	0,2654	0,2804	0,2956	0,3110	0,3266	0,3424	0,3584	0,3747	0,3913
	1,40	0,2498	0,2647	0,2797	0,2949	0,3103	0,3259	0,3417	0,3577	0,3740	0,3907
	1,45	0,2491	0,2640	0,2790	0,2943	0,3096	0,3252	0,3410	0,3571	0,3734	0,3900
	1,50	0,2485	0,2634	0,2784	0,2936	0,3090	0,3246	0,3404	0,3564	0,3728	0,3894
0,1	1,00	0,2667	0,2823	0,2981	0,3140	0,3299	0,3461	0,3624	0,3790	0,3958	0,4130
	1,05	0,2637	0,2795	0,2953	0,3112	0,3272	0,3434	0,3598	0,3764	0,3932	0,4104
	1,10	0,2610	0,2768	0,2927	0,3087	0,3247	0,3410	0,3573	0,3740	0,3908	0,4080
	1,15	0,2585	0,2744	0,2903	0,3063	0,3224	0,3387	0,3551	0,3717	0,3886	0,4059
	1,20	0,2561	0,2721	0,2881	0,3041	0,3203	0,3366	0,3530	0,3697	0,3866	0,4039
	1,25	0,2539	0,2699	0,2860	0,3021	0,3183	0,3346	0,3511	0,3678	0,3847	0,4020
	1,30	0,2518	0,2679	0,2840	0,3002	0,3164	0,3328	0,3493	0,3660	0,3830	0,4003
	1,35	0,2499	0,2660	0,2822	0,2984	0,3147	0,3311	0,3476	0,3644	0,3814	0,3987
	1,40	0,2480	0,2643	0,2805	0,2968	0,3131	0,3295	0,3461	0,3628	0,3799	0,3972
	1,45	0,2463	0,2626	0,2789	0,2952	0,3115	0,3280	0,3446	0,3614	0,3784	0,3958
	1,50	0,2447	0,2611	0,2774	0,2937	0,3101	0,3266	0,3432	0,3600	0,3771	0,3944
0,15	1,00	0,2794	0,2958	0,3121	0,3285	0,3450	0,3616	0,3783	0,3952	0,4125	0,4301
	1,05	0,2744	0,2910	0,3075	0,3241	0,3407	0,3574	0,3742	0,3912	0,4085	0,4261
	1,10	0,2697	0,2865	0,3032	0,3199	0,3366	0,3534	0,3703	0,3874	0,4048	0,4225
	1,15	0,2652	0,2822	0,2992	0,3160	0,3328	0,3497	0,3667	0,3839	0,4013	0,4191
	1,20	0,2609	0,2782	0,2953	0,3123	0,3293	0,3463	0,3634	0,3806	0,3981	0,4159
	1,25	0,2567	0,2743	0,2917	0,3088	0,3259	0,3430	0,3602	0,3776	0,3951	0,4130
	1,30	0,2527	0,2706	0,2882	0,3055	0,3228	0,3400	0,3573	0,3747	0,3923	0,4102
	1,35	0,2488	0,2671	0,2849	0,3024	0,3198	0,3371	0,3545	0,3720	0,3896	0,4076
	1,40	0,2450	0,2637	0,2817	0,2994	0,3169	0,3344	0,3518	0,3694	0,3871	0,4051
	1,45	0,2412	0,2603	0,2787	0,2966	0,3142	0,3318	0,3493	0,3670	0,3848	0,4028
	1,50	0,2375	0,2571	0,2758	0,2938	0,3117	0,3293	0,3470	0,3647	0,3826	0,4007
0,2	1,00	0,2963	0,3130	0,3296	0,3462	0,3629	0,3797	0,3966	0,4137	0,4311	0,4490
	1,05	0,2893	0,3063	0,3233	0,3401	0,3570	0,3740	0,3910	0,4083	0,4258	0,4438
	1,10	0,2823	0,2999	0,3172	0,3343	0,3514	0,3686	0,3858	0,4032	0,4208	0,4389
	1,15	0,2755	0,2936	0,3113	0,3287	0,3461	0,3634	0,3808	0,3984	0,4161	0,4343
	1,20	0,2686	0,2874	0,3056	0,3234	0,3410	0,3585	0,3761	0,3938	0,4117	0,4300
	1,25	0,2616	0,2813	0,3000	0,3182	0,3361	0,3539	0,3716	0,3895	0,4075	0,4259
	1,30	0,2543	0,2751	0,2945	0,3131	0,3314	0,3494	0,3674	0,3854	0,4036	0,4220
	1,35	0,2464	0,2689	0,2891	0,3082	0,3268	0,3451	0,3633	0,3815	0,3998	0,4183
	1,40	0,2372	0,2625	0,2837	0,3034	0,3224	0,3410	0,3594	0,3778	0,3962	0,4149
	1,45	0,2238	0,2556	0,2783	0,2987	0,3181	0,3370	0,3557	0,3742	0,3928	0,4116
	1,50		0,2480	0,2727	0,2940	0,3140	0,3332	0,3521	0,3708	0,3895	0,4084
0,25	1,00	0,3169	0,3334	0,3500	0,3665	0,3831	0,3998	0,4166	0,4337	0,4512	0,4693
	1,05	0,3083	0,3253	0,3422	0,3590	0,3759	0,3928	0,4099	0,4272	0,4448	0,4630
	1,10	0,2996	0,3172	0,3346	0,3518	0,3690	0,3862	0,4034	0,4209	0,4387	0,4570
	1,15	0,2907	0,3091	0,3271	0,3447	0,3622	0,3797	0,3973	0,4149	0,4329	0,4513
	1,20	0,2813	0,3009	0,3196	0,3378	0,3557	0,3735	0,3913	0,4092	0,4273	0,4459
	1,25	0,2710	0,2924	0,3120	0,3309	0,3493	0,3675	0,3856	0,4037	0,4220	0,4407
	1,30	0,2584	0,2832	0,3043	0,3240	0,3430	0,3616	0,3800	0,3984	0,4170	0,4358
	1,35	0,2134	0,2728	0,2962	0,3170	0,3367	0,3558	0,3746	0,3933	0,4121	0,4311
	1,40		0,2590	0,2875	0,3099	0,3305	0,3501	0,3693	0,3883	0,4073	0,4266
	1,45			0,2774	0,3025	0,3242	0,3445	0,3642	0,3835	0,4028	0,4222
	1,50			0,2636	0,2944	0,3177	0,3389	0,3591	0,3788	0,3984	0,4180
0,3	1,00	0,3396	0,3558	0,3719	0,3882	0,4045	0,4209	0,4375	0,4544	0,4718	0,4843
	1,05	0,3302	0,3468	0,3633	0,3798	0,3964	0,4131	0,4300	0,4471	0,4646	0,4813
	1,10	0,3206	0,3377	0,3547	0,3717	0,3886	0,4056	0,4227	0,4400	0,4577	0,4763
	1,15	0,3106	0,3285	0,3461	0,3635	0,3808	0,3982	0,4156	0,4331	0,4511	0,4697
	1,20	0,2998	0,3190	0,3374	0,3554	0,3732	0,3909	0,4086	0,4265	0,4446	0,4634
	1,25	0,2874	0,3087	0,3284	0,3472	0,3656	0,3837	0,4018	0,4200	0,4384	0,4573
	1,30	0,2706	0,2972	0,3188	0,3388	0,3579	0,3766	0,3952	0,4137	0,4323	0,4514
	1,35	0,2505	0,2824	0,3083	0,3300	0,3501	0,3695	0,3886	0,4075	0,4265	0,4458
	1,40	0,2381	0,2519	0,2955	0,3204	0,3421	0,3624	0,3820	0,4014	0,4207	0,4403
	1,45		0,2352	0,2727	0,3096	0,3336	0,3551	0,3755	0,3953	0,4151	0,4349
	1,50			0,2303	0,2955	0,3243	0,3475	0,3688	0,3894	0,4095	0,4297

μ_{lu} pour S 500 B ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 21

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2662	0,2806	0,2952	0,3101	0,3251	0,3404	0,3559	0,3717	0,3878	0,4043
0,05	1,00	0,2719	0,2870	0,3024	0,3178	0,3335	0,3494	0,3654	0,3818	0,3984	0,4154
	1,05	0,2708	0,2859	0,3013	0,3168	0,3324	0,3483	0,3644	0,3807	0,3973	0,4143
	1,10	0,2698	0,2849	0,3003	0,3158	0,3314	0,3473	0,3634	0,3797	0,3964	0,4134
	1,15	0,2688	0,2840	0,2994	0,3149	0,3305	0,3464	0,3625	0,3788	0,3955	0,4125
	1,20	0,2680	0,2832	0,2985	0,3140	0,3297	0,3456	0,3617	0,3780	0,3947	0,4117
	1,25	0,2672	0,2824	0,2977	0,3133	0,3289	0,3448	0,3609	0,3773	0,3939	0,4109
	1,30	0,2665	0,2817	0,2970	0,3125	0,3282	0,3441	0,3602	0,3766	0,3932	0,4102
	1,35	0,2658	0,2810	0,2963	0,3119	0,3276	0,3435	0,3596	0,3759	0,3926	0,4096
	1,40	0,2651	0,2804	0,2957	0,3113	0,3270	0,3429	0,3590	0,3753	0,3920	0,4090
	1,45	0,2645	0,2798	0,2951	0,3107	0,3264	0,3423	0,3584	0,3748	0,3914	0,4084
	1,50	0,2640	0,2792	0,2946	0,3101	0,3259	0,3418	0,3579	0,3742	0,3909	0,4079
0,1	1,00	0,2797	0,2956	0,3116	0,3278	0,3440	0,3604	0,3769	0,3938	0,4109	0,4284
	1,05	0,2771	0,2931	0,3092	0,3253	0,3416	0,3581	0,3747	0,3915	0,4086	0,4261
	1,10	0,2748	0,2908	0,3069	0,3231	0,3395	0,3559	0,3726	0,3894	0,4066	0,4241
	1,15	0,2726	0,2887	0,3048	0,3211	0,3374	0,3539	0,3706	0,3875	0,4047	0,4222
	1,20	0,2705	0,2867	0,3029	0,3192	0,3356	0,3521	0,3688	0,3857	0,4029	0,4205
	1,25	0,2686	0,2848	0,3011	0,3174	0,3339	0,3504	0,3672	0,3841	0,4013	0,4189
	1,30	0,2668	0,2831	0,2994	0,3158	0,3323	0,3489	0,3656	0,3826	0,3998	0,4174
	1,35	0,2652	0,2815	0,2979	0,3143	0,3308	0,3474	0,3642	0,3811	0,3984	0,4160
	1,40	0,2636	0,2800	0,2964	0,3128	0,3294	0,3460	0,3628	0,3798	0,3971	0,4147
	1,45	0,2621	0,2786	0,2950	0,3115	0,3280	0,3447	0,3615	0,3786	0,3959	0,4135
	1,50	0,2607	0,2772	0,2937	0,3102	0,3268	0,3435	0,3604	0,3774	0,3947	0,4124
0,15	1,00	0,2904	0,3070	0,3236	0,3402	0,3569	0,3737	0,3906	0,4078	0,4253	0,4432
	1,05	0,2861	0,3028	0,3196	0,3363	0,3531	0,3700	0,3870	0,4043	0,4218	0,4398
	1,10	0,2819	0,2989	0,3158	0,3327	0,3496	0,3666	0,3837	0,4010	0,4186	0,4366
	1,15	0,2780	0,2952	0,3123	0,3293	0,3463	0,3634	0,3806	0,3979	0,4156	0,4336
	1,20	0,2743	0,2917	0,3090	0,3261	0,3432	0,3604	0,3777	0,3951	0,4128	0,4309
	1,25	0,2708	0,2884	0,3058	0,3231	0,3403	0,3576	0,3749	0,3925	0,4102	0,4284
	1,30	0,2674	0,2853	0,3028	0,3202	0,3376	0,3550	0,3724	0,3900	0,4078	0,4260
	1,35	0,2642	0,2823	0,3000	0,3176	0,3350	0,3525	0,3700	0,3876	0,4055	0,4237
	1,40	0,2611	0,2794	0,2973	0,3150	0,3326	0,3501	0,3677	0,3855	0,4034	0,4216
	1,45	0,2580	0,2767	0,2948	0,3126	0,3303	0,3479	0,3656	0,3834	0,4014	0,4197
	1,50	0,2551	0,2741	0,2924	0,3103	0,3281	0,3458	0,3636	0,3814	0,3995	0,4178
0,2	1,00	0,3047	0,3217	0,3386	0,3555	0,3723	0,3893	0,4064	0,4238	0,4414	0,4597
	1,05	0,2984	0,3158	0,3329	0,3500	0,3671	0,3843	0,4015	0,4190	0,4368	0,4551
	1,10	0,2923	0,3101	0,3275	0,3449	0,3622	0,3795	0,3969	0,4145	0,4324	0,4508
	1,15	0,2863	0,3045	0,3224	0,3400	0,3575	0,3750	0,3926	0,4103	0,4283	0,4468
	1,20	0,2804	0,2992	0,3174	0,3353	0,3530	0,3708	0,3885	0,4064	0,4245	0,4430
	1,25	0,2745	0,2939	0,3126	0,3308	0,3488	0,3667	0,3846	0,4026	0,4209	0,4395
	1,30	0,2685	0,2887	0,3079	0,3265	0,3447	0,3629	0,3809	0,3991	0,4174	0,4361
	1,35	0,2623	0,2836	0,3033	0,3223	0,3409	0,3592	0,3774	0,3957	0,4142	0,4330
	1,40	0,2558	0,2784	0,2989	0,3183	0,3371	0,3557	0,3741	0,3925	0,4111	0,4300
	1,45	0,2486	0,2732	0,2945	0,3143	0,3335	0,3523	0,3709	0,3895	0,4082	0,4272
	1,50	0,2401	0,2679	0,2901	0,3105	0,3300	0,3491	0,3679	0,3866	0,4054	0,4245
0,25	1,00	0,3226	0,3395	0,3563	0,3731	0,3900	0,4069	0,4239	0,4412	0,4590	0,4776
	1,05	0,3147	0,3321	0,3493	0,3664	0,3835	0,4006	0,4179	0,4354	0,4533	0,4719
	1,10	0,3067	0,3247	0,3424	0,3599	0,3773	0,3947	0,4122	0,4299	0,4479	0,4666
	1,15	0,2987	0,3174	0,3356	0,3535	0,3713	0,3890	0,4067	0,4246	0,4428	0,4616
	1,20	0,2902	0,3100	0,3289	0,3473	0,3655	0,3835	0,4015	0,4196	0,4379	0,4568
	1,25	0,2812	0,3025	0,3223	0,3413	0,3598	0,3782	0,3964	0,4148	0,4333	0,4523
	1,30	0,2708	0,2946	0,3156	0,3353	0,3543	0,3730	0,3916	0,4101	0,4289	0,4480
	1,35	0,2565	0,2861	0,3087	0,3293	0,3489	0,3680	0,3869	0,4057	0,4246	0,4439
	1,40		0,2762	0,3015	0,3233	0,3436	0,3631	0,3824	0,4014	0,4206	0,4400
	1,45		0,2624	0,2938	0,3171	0,3383	0,3584	0,3780	0,3973	0,4167	0,4363
	1,50			0,2851	0,3108	0,3330	0,3537	0,3737	0,3933	0,4129	0,4327
0,3	1,00	0,3431	0,3595	0,3760	0,3925	0,4090	0,4256	0,4424	0,4595	0,4772	0,4868
	1,05	0,3341	0,3511	0,3680	0,3848	0,4016	0,4186	0,4356	0,4529	0,4708	0,4840
	1,10	0,3250	0,3427	0,3600	0,3773	0,3945	0,4117	0,4290	0,4466	0,4646	0,4815
	1,15	0,3156	0,3341	0,3521	0,3698	0,3874	0,4050	0,4226	0,4404	0,4586	0,4778
	1,20	0,3053	0,3252	0,3440	0,3624	0,3805	0,3985	0,4164	0,4345	0,4529	0,4721
	1,25	0,2936	0,3157	0,3358	0,3550	0,3736	0,3920	0,4104	0,4288	0,4474	0,4667
	1,30	0,2775	0,3051	0,3271	0,3474	0,3668	0,3857	0,4045	0,4232	0,4421	0,4615
	1,35	0,2494	0,2919	0,3177	0,3395	0,3599	0,3794	0,3986	0,4177	0,4369	0,4566
	1,40		0,2510	0,3068	0,3312	0,3528	0,3732	0,3929	0,4124	0,4319	0,4518
	1,45			0,2919	0,3222	0,3455	0,3668	0,3872	0,4072	0,4270	0,4471
	1,50				0,3115	0,3378	0,3604	0,3816	0,4020	0,4222	0,4426

μ_{lu} pour S 500 B ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 24

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2788	0,2935	0,3085	0,3236	0,3389	0,3545	0,3703	0,3863	0,4027	0,4195
0,05	1,00	0,2838	0,2992	0,3148	0,3305	0,3463	0,3624	0,3787	0,3952	0,4121	0,4294
	1,05	0,2828	0,2982	0,3138	0,3295	0,3454	0,3615	0,3777	0,3943	0,4112	0,4285
	1,10	0,2819	0,2973	0,3129	0,3286	0,3445	0,3606	0,3769	0,3934	0,4103	0,4276
	1,15	0,2811	0,2965	0,3121	0,3278	0,3437	0,3598	0,3761	0,3927	0,4095	0,4268
	1,20	0,2803	0,2958	0,3113	0,3271	0,3430	0,3591	0,3754	0,3919	0,4088	0,4261
	1,25	0,2796	0,2951	0,3107	0,3264	0,3423	0,3584	0,3747	0,3913	0,4082	0,4255
	1,30	0,2790	0,2944	0,3100	0,3258	0,3417	0,3578	0,3741	0,3907	0,4076	0,4249
	1,35	0,2784	0,2938	0,3094	0,3252	0,3411	0,3572	0,3735	0,3901	0,4070	0,4243
	1,40	0,2778	0,2933	0,3089	0,3246	0,3406	0,3567	0,3730	0,3896	0,4065	0,4238
	1,45	0,2773	0,2928	0,3084	0,3241	0,3400	0,3562	0,3725	0,3891	0,4060	0,4233
	1,50	0,2768	0,2923	0,3079	0,3236	0,3396	0,3557	0,3720	0,3886	0,4055	0,4228
0,1	1,00	0,2906	0,3067	0,3229	0,3392	0,3555	0,3721	0,3888	0,4058	0,4231	0,4408
	1,05	0,2883	0,3045	0,3207	0,3370	0,3535	0,3700	0,3868	0,4038	0,4211	0,4389
	1,10	0,2862	0,3024	0,3187	0,3351	0,3515	0,3682	0,3849	0,4020	0,4193	0,4371
	1,15	0,2843	0,3006	0,3169	0,3333	0,3498	0,3664	0,3832	0,4003	0,4177	0,4355
	1,20	0,2825	0,2988	0,3152	0,3316	0,3481	0,3648	0,3817	0,3987	0,4161	0,4339
	1,25	0,2808	0,2972	0,3136	0,3300	0,3466	0,3633	0,3802	0,3973	0,4147	0,4325
	1,30	0,2793	0,2957	0,3121	0,3286	0,3452	0,3619	0,3788	0,3960	0,4134	0,4312
	1,35	0,2778	0,2943	0,3107	0,3273	0,3439	0,3607	0,3776	0,3947	0,4122	0,4300
	1,40	0,2764	0,2929	0,3094	0,3260	0,3427	0,3594	0,3764	0,3936	0,4110	0,4289
	1,45	0,2751	0,2917	0,3082	0,3248	0,3415	0,3583	0,3753	0,3925	0,4099	0,4278
	1,50	0,2739	0,2905	0,3071	0,3237	0,3404	0,3573	0,3742	0,3915	0,4089	0,4268
0,15	1,00	0,2998	0,3166	0,3333	0,3500	0,3668	0,3837	0,4008	0,4181	0,4357	0,4539
	1,05	0,2960	0,3129	0,3297	0,3466	0,3635	0,3805	0,3976	0,4150	0,4327	0,4509
	1,10	0,2923	0,3094	0,3264	0,3433	0,3603	0,3774	0,3947	0,4121	0,4299	0,4481
	1,15	0,2889	0,3061	0,3233	0,3403	0,3574	0,3746	0,3919	0,4094	0,4272	0,4455
	1,20	0,2857	0,3031	0,3203	0,3375	0,3547	0,3720	0,3894	0,4069	0,4248	0,4431
	1,25	0,2826	0,3002	0,3176	0,3349	0,3522	0,3695	0,3870	0,4046	0,4225	0,4409
	1,30	0,2797	0,2975	0,3150	0,3324	0,3498	0,3672	0,3848	0,4024	0,4204	0,4388
	1,35	0,2769	0,2949	0,3125	0,3301	0,3476	0,3651	0,3827	0,4004	0,4184	0,4368
	1,40	0,2743	0,2924	0,3102	0,3279	0,3455	0,3630	0,3807	0,3985	0,4166	0,4350
	1,45	0,2717	0,2901	0,3080	0,3258	0,3435	0,3611	0,3788	0,3967	0,4148	0,4333
	1,50	0,2693	0,2878	0,3060	0,3238	0,3416	0,3593	0,3771	0,3950	0,4131	0,4317
0,2	1,00	0,3122	0,3293	0,3463	0,3633	0,3803	0,3974	0,4147	0,4321	0,4500	0,4685
	1,05	0,3065	0,3239	0,3412	0,3585	0,3757	0,3929	0,4103	0,4279	0,4458	0,4644
	1,10	0,3010	0,3188	0,3364	0,3539	0,3713	0,3887	0,4062	0,4239	0,4420	0,4606
	1,15	0,2957	0,3139	0,3318	0,3495	0,3671	0,3847	0,4024	0,4202	0,4384	0,4571
	1,20	0,2905	0,3092	0,3274	0,3454	0,3632	0,3810	0,3988	0,4167	0,4350	0,4538
	1,25	0,2854	0,3046	0,3232	0,3414	0,3595	0,3774	0,3954	0,4135	0,4318	0,4506
	1,30	0,2804	0,3002	0,3192	0,3377	0,3559	0,3740	0,3921	0,4104	0,4288	0,4477
	1,35	0,2753	0,2958	0,3152	0,3340	0,3525	0,3708	0,3891	0,4074	0,4260	0,4450
	1,40	0,2702	0,2916	0,3114	0,3306	0,3493	0,3678	0,3862	0,4046	0,4233	0,4423
	1,45	0,2649	0,2873	0,3077	0,3272	0,3462	0,3649	0,3834	0,4020	0,4208	0,4399
	1,50	0,2594	0,2831	0,3041	0,3240	0,3432	0,3621	0,3808	0,3995	0,4183	0,4375
0,25	1,00	0,3278	0,3450	0,3620	0,3789	0,3959	0,4129	0,4301	0,4476	0,4655	0,4818
	1,05	0,3205	0,3381	0,3555	0,3728	0,3900	0,4073	0,4247	0,4423	0,4604	0,4794
	1,10	0,3133	0,3314	0,3493	0,3669	0,3844	0,4020	0,4196	0,4374	0,4556	0,4746
	1,15	0,3059	0,3248	0,3432	0,3612	0,3791	0,3969	0,4147	0,4327	0,4511	0,4701
	1,20	0,2984	0,3182	0,3372	0,3557	0,3739	0,3920	0,4100	0,4282	0,4467	0,4659
	1,25	0,2905	0,3116	0,3313	0,3503	0,3689	0,3872	0,4056	0,4240	0,4427	0,4619
	1,30	0,2818	0,3047	0,3254	0,3450	0,3640	0,3827	0,4013	0,4199	0,4388	0,4581
	1,35	0,2715	0,2976	0,3195	0,3398	0,3593	0,3783	0,3972	0,4160	0,4350	0,4545
	1,40	0,2548	0,2898	0,3134	0,3346	0,3546	0,3741	0,3932	0,4123	0,4315	0,4511
	1,45		0,2809	0,3072	0,3294	0,3501	0,3699	0,3894	0,4087	0,4281	0,4478
	1,50		0,2688	0,3006	0,3242	0,3456	0,3659	0,3857	0,4053	0,4248	0,4447
0,3	1,00	0,3463	0,3630	0,3797	0,3963	0,4130	0,4297	0,4467	0,4639	0,4808	0,4888
	1,05	0,3379	0,3551	0,3722	0,3892	0,4062	0,4233	0,4405	0,4579	0,4760	0,4863
	1,10	0,3293	0,3472	0,3648	0,3823	0,3997	0,4170	0,4345	0,4522	0,4704	0,4840
	1,15	0,3204	0,3392	0,3575	0,3755	0,3932	0,4110	0,4287	0,4467	0,4651	0,4818
	1,20	0,3108	0,3310	0,3501	0,3687	0,3869	0,4050	0,4231	0,4414	0,4600	0,4796
	1,25	0,2999	0,3223	0,3426	0,3619	0,3807	0,3993	0,4177	0,4362	0,4550	0,4747
	1,30	0,2856	0,3127	0,3348	0,3551	0,3746	0,3936	0,4124	0,4312	0,4503	0,4701
	1,35	0,2474	0,3014	0,3265	0,3481	0,3684	0,3880	0,4073	0,4264	0,4457	0,4656
	1,40		0,2835	0,3172	0,3409	0,3622	0,3825	0,4022	0,4217	0,4413	0,4614
	1,45			0,3060	0,3332	0,3559	0,3770	0,3972	0,4171	0,4370	0,4573
	1,50				0,3247	0,3494	0,3715	0,3923	0,4127	0,4329	0,4533

μ_{lu} pour S 500 B ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 27

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2894	0,3043	0,3195	0,3348	0,3503	0,3661	0,3821	0,3983	0,4149	0,4320
0,05	1,00	0,2938	0,3094	0,3251	0,3410	0,3570	0,3732	0,3896	0,4063	0,4234	0,4409
	1,05	0,2930	0,3085	0,3243	0,3401	0,3561	0,3724	0,3888	0,4055	0,4225	0,4400
	1,10	0,2921	0,3077	0,3235	0,3393	0,3554	0,3716	0,3880	0,4047	0,4218	0,4393
	1,15	0,2914	0,3070	0,3227	0,3386	0,3547	0,3709	0,3873	0,4040	0,4211	0,4386
	1,20	0,2907	0,3063	0,3221	0,3379	0,3540	0,3702	0,3867	0,4034	0,4205	0,4380
	1,25	0,2901	0,3057	0,3214	0,3373	0,3534	0,3696	0,3861	0,4028	0,4199	0,4374
	1,30	0,2895	0,3051	0,3209	0,3368	0,3528	0,3691	0,3855	0,4023	0,4193	0,4368
	1,35	0,2890	0,3046	0,3203	0,3362	0,3523	0,3686	0,3850	0,4018	0,4188	0,4363
	1,40	0,2885	0,3041	0,3198	0,3358	0,3518	0,3681	0,3846	0,4013	0,4184	0,4359
	1,45	0,2880	0,3036	0,3194	0,3353	0,3514	0,3676	0,3841	0,4008	0,4179	0,4354
	1,50	0,2875	0,3032	0,3190	0,3349	0,3510	0,3672	0,3837	0,4004	0,4175	0,4350
0,1	1,00	0,2998	0,3160	0,3323	0,3487	0,3652	0,3818	0,3987	0,4157	0,4332	0,4511
	1,05	0,2978	0,3141	0,3304	0,3468	0,3633	0,3800	0,3969	0,4140	0,4314	0,4494
	1,10	0,2959	0,3122	0,3286	0,3450	0,3616	0,3783	0,3952	0,4123	0,4298	0,4478
	1,15	0,2942	0,3105	0,3270	0,3434	0,3600	0,3768	0,3937	0,4109	0,4283	0,4463
	1,20	0,2926	0,3090	0,3254	0,3420	0,3586	0,3753	0,3923	0,4095	0,4270	0,4450
	1,25	0,2911	0,3075	0,3240	0,3406	0,3572	0,3740	0,3910	0,4082	0,4257	0,4437
	1,30	0,2897	0,3062	0,3227	0,3393	0,3560	0,3728	0,3898	0,4070	0,4246	0,4426
	1,35	0,2884	0,3049	0,3215	0,3381	0,3548	0,3716	0,3887	0,4059	0,4235	0,4415
	1,40	0,2872	0,3038	0,3203	0,3370	0,3537	0,3706	0,3876	0,4049	0,4225	0,4405
	1,45	0,2861	0,3026	0,3193	0,3359	0,3527	0,3696	0,3866	0,4039	0,4215	0,4396
	1,50	0,2850	0,3016	0,3182	0,3349	0,3517	0,3686	0,3857	0,4030	0,4206	0,4387
0,15	1,00	0,3079	0,3247	0,3415	0,3583	0,3752	0,3922	0,4093	0,4267	0,4444	0,4628
	1,05	0,3044	0,3214	0,3383	0,3552	0,3722	0,3892	0,4065	0,4239	0,4417	0,4601
	1,10	0,3012	0,3183	0,3353	0,3523	0,3694	0,3865	0,4038	0,4213	0,4392	0,4576
	1,15	0,2981	0,3154	0,3325	0,3497	0,3668	0,3840	0,4014	0,4190	0,4369	0,4553
	1,20	0,2953	0,3127	0,3299	0,3472	0,3644	0,3817	0,3991	0,4167	0,4347	0,4532
	1,25	0,2926	0,3101	0,3275	0,3448	0,3621	0,3795	0,3970	0,4147	0,4327	0,4512
	1,30	0,2900	0,3077	0,3252	0,3426	0,3600	0,3775	0,3950	0,4128	0,4308	0,4494
	1,35	0,2876	0,3054	0,3230	0,3406	0,3580	0,3755	0,3932	0,4110	0,4290	0,4476
	1,40	0,2853	0,3033	0,3210	0,3386	0,3562	0,3738	0,3914	0,4093	0,4274	0,4460
	1,45	0,2831	0,3012	0,3191	0,3368	0,3544	0,3721	0,3898	0,4077	0,4259	0,4445
	1,50	0,2810	0,2993	0,3173	0,3350	0,3528	0,3705	0,3882	0,4062	0,4244	0,4431
0,2	1,00	0,3187	0,3359	0,3530	0,3701	0,3871	0,4043	0,4216	0,4391	0,4571	0,4759
	1,05	0,3136	0,3311	0,3484	0,3657	0,3829	0,4003	0,4177	0,4354	0,4534	0,4722
	1,10	0,3086	0,3265	0,3441	0,3616	0,3790	0,3965	0,4140	0,4318	0,4500	0,4688
	1,15	0,3039	0,3221	0,3400	0,3577	0,3753	0,3929	0,4106	0,4285	0,4467	0,4657
	1,20	0,2993	0,3179	0,3361	0,3540	0,3718	0,3896	0,4074	0,4254	0,4437	0,4627
	1,25	0,2949	0,3139	0,3323	0,3505	0,3685	0,3864	0,4044	0,4225	0,4409	0,4599
	1,30	0,2905	0,3100	0,3287	0,3471	0,3653	0,3834	0,4015	0,4197	0,4383	0,4573
	1,35	0,2862	0,3062	0,3253	0,3440	0,3623	0,3806	0,3988	0,4171	0,4357	0,4549
	1,40	0,2819	0,3025	0,3220	0,3409	0,3595	0,3779	0,3962	0,4147	0,4334	0,4526
	1,45	0,2777	0,2989	0,3188	0,3380	0,3568	0,3753	0,3938	0,4124	0,4311	0,4504
	1,50	0,2734	0,2954	0,3157	0,3352	0,3542	0,3729	0,3915	0,4102	0,4290	0,4483
0,25	1,00	0,3326	0,3498	0,3669	0,3840	0,4010	0,4182	0,4354	0,4529	0,4710	0,4842
	1,05	0,3258	0,3435	0,3610	0,3784	0,3957	0,4131	0,4305	0,4482	0,4664	0,4823
	1,10	0,3192	0,3374	0,3553	0,3730	0,3906	0,4082	0,4259	0,4438	0,4621	0,4806
	1,15	0,3125	0,3314	0,3498	0,3679	0,3858	0,4036	0,4215	0,4396	0,4580	0,4774
	1,20	0,3058	0,3255	0,3444	0,3629	0,3811	0,3992	0,4173	0,4356	0,4542	0,4736
	1,25	0,2988	0,3196	0,3391	0,3581	0,3766	0,3950	0,4133	0,4318	0,4505	0,4700
	1,30	0,2914	0,3136	0,3339	0,3534	0,3723	0,3910	0,4095	0,4282	0,4471	0,4666
	1,35	0,2832	0,3075	0,3288	0,3488	0,3681	0,3871	0,4059	0,4247	0,4438	0,4634
	1,40	0,2733	0,3011	0,3236	0,3443	0,3640	0,3833	0,4024	0,4214	0,4406	0,4604
	1,45		0,2942	0,3184	0,3398	0,3601	0,3797	0,3990	0,4182	0,4376	0,4575
	1,50		0,2865	0,3130	0,3354	0,3562	0,3762	0,3958	0,4152	0,4347	0,4547
0,3	1,00	0,3493	0,3662	0,3830	0,3997	0,4165	0,4333	0,4503	0,4677	0,4825	0,4905
	1,05	0,3413	0,3588	0,3760	0,3932	0,4103	0,4274	0,4447	0,4622	0,4802	0,4883
	1,10	0,3333	0,3514	0,3692	0,3868	0,4042	0,4217	0,4392	0,4570	0,4754	0,4861
	1,15	0,3249	0,3440	0,3624	0,3805	0,3983	0,4161	0,4340	0,4520	0,4706	0,4842
	1,20	0,3160	0,3364	0,3556	0,3743	0,3926	0,4108	0,4289	0,4472	0,4659	0,4823
	1,25	0,3061	0,3284	0,3488	0,3681	0,3870	0,4056	0,4240	0,4426	0,4615	0,4806
	1,30	0,2936	0,3199	0,3417	0,3620	0,3814	0,4005	0,4193	0,4381	0,4573	0,4773
	1,35	0,2435	0,3101	0,3344	0,3558	0,3759	0,3955	0,4147	0,4338	0,4532	0,4733
	1,40		0,2973	0,3264	0,3494	0,3705	0,3905	0,4102	0,4296	0,4493	0,4695
	1,45			0,3174	0,3428	0,3649	0,3857	0,4058	0,4256	0,4455	0,4659
	1,50			0,3059	0,3358	0,3594	0,3809	0,4015	0,4216	0,4418	0,4624

μ_{lu} pour S 500 B ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 6

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1520	0,1619	0,1721	0,1825	0,1931	0,2040	0,2151	0,2265	0,2381	0,2499
0,05	1,00	0,1658	0,1772	0,1888	0,2005	0,2125	0,2246	0,2369	0,2495	0,2622	0,2752
	1,05	0,1633	0,1747	0,1863	0,1981	0,2100	0,2221	0,2345	0,2470	0,2597	0,2727
	1,10	0,1610	0,1724	0,1840	0,1958	0,2077	0,2199	0,2322	0,2447	0,2574	0,2704
	1,15	0,1588	0,1703	0,1819	0,1937	0,2057	0,2178	0,2301	0,2426	0,2553	0,2683
	1,20	0,1568	0,1683	0,1800	0,1918	0,2037	0,2158	0,2282	0,2407	0,2534	0,2663
	1,25	0,1550	0,1665	0,1782	0,1900	0,2019	0,2141	0,2264	0,2389	0,2516	0,2645
	1,30	0,1532	0,1648	0,1765	0,1883	0,2003	0,2124	0,2247	0,2372	0,2499	0,2629
	1,35	0,1516	0,1632	0,1749	0,1867	0,1987	0,2108	0,2232	0,2357	0,2484	0,2613
	1,40	0,1500	0,1617	0,1734	0,1852	0,1972	0,2094	0,2217	0,2342	0,2469	0,2598
	1,45	0,1486	0,1603	0,1720	0,1839	0,1959	0,2080	0,2203	0,2329	0,2456	0,2585
	1,50	0,1472	0,1589	0,1707	0,1826	0,1946	0,2067	0,2191	0,2316	0,2443	0,2572
0,1	1,00	0,1888	0,2015	0,2142	0,2270	0,2399	0,2530	0,2663	0,2797	0,2933	0,3072
	1,05	0,1831	0,1958	0,2086	0,2215	0,2345	0,2477	0,2610	0,2744	0,2881	0,3020
	1,10	0,1775	0,1905	0,2034	0,2164	0,2295	0,2427	0,2560	0,2695	0,2832	0,2971
	1,15	0,1721	0,1853	0,1984	0,2116	0,2248	0,2380	0,2514	0,2650	0,2787	0,2926
	1,20	0,1667	0,1803	0,1937	0,2070	0,2203	0,2336	0,2471	0,2607	0,2744	0,2883
	1,25	0,1614	0,1754	0,1891	0,2026	0,2160	0,2294	0,2430	0,2566	0,2704	0,2844
	1,30	0,1561	0,1706	0,1846	0,1983	0,2119	0,2255	0,2391	0,2528	0,2667	0,2807
	1,35	0,1505	0,1659	0,1803	0,1942	0,2080	0,2217	0,2354	0,2492	0,2631	0,2771
	1,40	0,1445	0,1611	0,1760	0,1903	0,2043	0,2181	0,2319	0,2458	0,2598	0,2738
	1,45	0,1376	0,1561	0,1718	0,1865	0,2007	0,2147	0,2286	0,2426	0,2566	0,2707
	1,50	0,1274	0,1509	0,1676	0,1827	0,1972	0,2114	0,2254	0,2395	0,2535	0,2677
0,15	1,00	0,2206	0,2337	0,2469	0,2603	0,2738	0,2874	0,3013	0,3153	0,3295	0,3439
	1,05	0,2122	0,2255	0,2389	0,2523	0,2659	0,2796	0,2935	0,3076	0,3218	0,3363
	1,10	0,2038	0,2174	0,2310	0,2447	0,2584	0,2722	0,2862	0,3003	0,3146	0,3291
	1,15	0,1954	0,2094	0,2234	0,2372	0,2511	0,2651	0,2792	0,2934	0,3077	0,3223
	1,20	0,1866	0,2014	0,2158	0,2300	0,2441	0,2582	0,2724	0,2868	0,3012	0,3158
	1,25	0,1771	0,1931	0,2081	0,2228	0,2372	0,2516	0,2660	0,2804	0,2950	0,3097
	1,30	0,1657	0,1842	0,2003	0,2156	0,2305	0,2452	0,2598	0,2744	0,2891	0,3039
	1,35	0,1375	0,1738	0,1921	0,2083	0,2238	0,2388	0,2537	0,2685	0,2834	0,2983
	1,40	0,1301	0,1578	0,1829	0,2007	0,2170	0,2326	0,2478	0,2628	0,2778	0,2929
	1,45		0,1291	0,1710	0,1925	0,2101	0,2263	0,2419	0,2573	0,2725	0,2877
	1,50			0,1277	0,1830	0,2028	0,2199	0,2361	0,2519	0,2673	0,2828
0,2	1,00	0,2562	0,2696	0,2831	0,2967	0,3106	0,3245	0,3387	0,3531	0,3677	0,3826
	1,05	0,2463	0,2598	0,2734	0,2871	0,3010	0,3150	0,3292	0,3436	0,3582	0,3731
	1,10	0,2364	0,2501	0,2639	0,2777	0,2917	0,3058	0,3201	0,3345	0,3492	0,3641
	1,15	0,2265	0,2405	0,2545	0,2685	0,2827	0,2969	0,3113	0,3258	0,3406	0,3555
	1,20	0,2162	0,2308	0,2451	0,2595	0,2738	0,2883	0,3028	0,3174	0,3323	0,3473
	1,25	0,2051	0,2206	0,2356	0,2504	0,2651	0,2798	0,2945	0,3093	0,3243	0,3394
	1,30	0,1921	0,2096	0,2257	0,2412	0,2563	0,2714	0,2863	0,3014	0,3165	0,3317
	1,35	0,1784	0,1965	0,2149	0,2315	0,2474	0,2629	0,2783	0,2936	0,3089	0,3243
	1,40	0,1734	0,1790	0,2019	0,2210	0,2381	0,2544	0,2702	0,2859	0,3015	0,3171
	1,45	0,1675	0,1737	0,1796	0,2086	0,2281	0,2455	0,2621	0,2782	0,2942	0,3101
	1,50	0,1581	0,1671	0,1740	0,1869	0,2165	0,2361	0,2537	0,2705	0,2869	0,3031
0,25	1,00	0,2917	0,3053	0,3191	0,3331	0,3472	0,3614	0,3759	0,3906	0,4055	0,4207
	1,05	0,2811	0,2947	0,3085	0,3224	0,3366	0,3508	0,3653	0,3800	0,3949	0,4100
	1,10	0,2706	0,2843	0,2981	0,3121	0,3263	0,3406	0,3551	0,3697	0,3847	0,3998
	1,15	0,2601	0,2739	0,2879	0,3020	0,3162	0,3306	0,3451	0,3599	0,3748	0,3900
	1,20	0,2494	0,2635	0,2777	0,2920	0,3063	0,3208	0,3355	0,3503	0,3653	0,3806
	1,25	0,2383	0,2529	0,2674	0,2820	0,2965	0,3112	0,3260	0,3409	0,3561	0,3714
	1,30	0,2262	0,2417	0,2568	0,2718	0,2867	0,3016	0,3167	0,3318	0,3470	0,3625
	1,35	0,2167	0,2293	0,2455	0,2612	0,2767	0,2920	0,3073	0,3227	0,3382	0,3538
	1,40	0,2119	0,2174	0,2329	0,2500	0,2663	0,2822	0,2980	0,3137	0,3294	0,3452
	1,45	0,2070	0,2126	0,2182	0,2372	0,2551	0,2720	0,2884	0,3046	0,3207	0,3368
	1,50	0,2016	0,2075	0,2133	0,2202	0,2424	0,2610	0,2785	0,2953	0,3119	0,3283
0,3	1,00	0,3250	0,3390	0,3531	0,3673	0,3817	0,3963	0,4110	0,4259	0,4411	0,4567
	1,05	0,3142	0,3281	0,3421	0,3563	0,3707	0,3852	0,3999	0,4148	0,4299	0,4455
	1,10	0,3035	0,3174	0,3314	0,3456	0,3599	0,3744	0,3891	0,4040	0,4191	0,4346
	1,15	0,2929	0,3068	0,3208	0,3350	0,3494	0,3639	0,3786	0,3935	0,4086	0,4241
	1,20	0,2822	0,2962	0,3103	0,3246	0,3390	0,3535	0,3683	0,3832	0,3984	0,4139
	1,25	0,2713	0,2855	0,2998	0,3142	0,3287	0,3433	0,3582	0,3732	0,3884	0,4039
	1,30	0,2600	0,2745	0,2891	0,3037	0,3184	0,3332	0,3482	0,3633	0,3786	0,3942
	1,35	0,2523	0,2630	0,2780	0,2930	0,3080	0,3231	0,3382	0,3535	0,3690	0,3847
	1,40	0,2476	0,2533	0,2663	0,2819	0,2973	0,3128	0,3282	0,3438	0,3594	0,3753
	1,45	0,2429	0,2486	0,2544	0,2699	0,2862	0,3022	0,3181	0,3339	0,3499	0,3660
	1,50	0,2380	0,2438	0,2496	0,2562	0,2740	0,2910	0,3075	0,3239	0,3403	0,3566

μ_{lu} pour S 500 B ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 9

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1942	0,2061	0,2183	0,2307	0,2433	0,2562	0,2693	0,2827	0,2963	0,3102
0,05	1,00	0,2044	0,2175	0,2308	0,2443	0,2580	0,2718	0,2859	0,3002	0,3148	0,3296
	1,05	0,2025	0,2156	0,2289	0,2424	0,2561	0,2699	0,2840	0,2983	0,3129	0,3277
	1,10	0,2008	0,2139	0,2272	0,2407	0,2543	0,2682	0,2823	0,2966	0,3111	0,3259
	1,15	0,1991	0,2123	0,2256	0,2391	0,2527	0,2666	0,2807	0,2950	0,3095	0,3243
	1,20	0,1977	0,2108	0,2241	0,2376	0,2513	0,2652	0,2792	0,2935	0,3081	0,3229
	1,25	0,1963	0,2094	0,2228	0,2362	0,2499	0,2638	0,2779	0,2922	0,3067	0,3215
	1,30	0,1950	0,2082	0,2215	0,2350	0,2487	0,2625	0,2766	0,2909	0,3055	0,3203
	1,35	0,1938	0,2070	0,2203	0,2338	0,2475	0,2614	0,2755	0,2898	0,3043	0,3191
	1,40	0,1927	0,2059	0,2192	0,2327	0,2464	0,2603	0,2744	0,2887	0,3032	0,3180
	1,45	0,1916	0,2048	0,2182	0,2317	0,2454	0,2593	0,2734	0,2877	0,3022	0,3170
	1,50	0,1906	0,2038	0,2172	0,2307	0,2444	0,2583	0,2724	0,2867	0,3012	0,3160
0,1	1,00	0,2201	0,2344	0,2487	0,2631	0,2777	0,2924	0,3073	0,3223	0,3376	0,3532
	1,05	0,2156	0,2300	0,2444	0,2589	0,2735	0,2883	0,3032	0,3183	0,3336	0,3492
	1,10	0,2114	0,2259	0,2404	0,2550	0,2696	0,2844	0,2994	0,3145	0,3299	0,3455
	1,15	0,2074	0,2220	0,2366	0,2513	0,2660	0,2809	0,2959	0,3111	0,3264	0,3420
	1,20	0,2035	0,2183	0,2331	0,2478	0,2627	0,2776	0,2926	0,3078	0,3232	0,3389
	1,25	0,1999	0,2149	0,2297	0,2446	0,2595	0,2745	0,2896	0,3048	0,3203	0,3359
	1,30	0,1964	0,2116	0,2266	0,2415	0,2565	0,2716	0,2867	0,3020	0,3175	0,3331
	1,35	0,1930	0,2084	0,2236	0,2387	0,2537	0,2688	0,2840	0,2993	0,3148	0,3306
	1,40	0,1897	0,2054	0,2207	0,2359	0,2511	0,2662	0,2815	0,2969	0,3124	0,3281
	1,45	0,1865	0,2025	0,2180	0,2333	0,2485	0,2638	0,2791	0,2945	0,3101	0,3258
	1,50	0,1834	0,1997	0,2154	0,2308	0,2462	0,2615	0,2768	0,2923	0,3079	0,3237
0,15	1,00	0,2425	0,2574	0,2723	0,2873	0,3024	0,3176	0,3330	0,3486	0,3644	0,3804
	1,05	0,2353	0,2505	0,2656	0,2808	0,2960	0,3113	0,3268	0,3424	0,3583	0,3744
	1,10	0,2282	0,2438	0,2591	0,2745	0,2899	0,3054	0,3209	0,3367	0,3526	0,3687
	1,15	0,2212	0,2372	0,2529	0,2685	0,2841	0,2997	0,3154	0,3312	0,3472	0,3635
	1,20	0,2142	0,2308	0,2469	0,2628	0,2786	0,2943	0,3102	0,3261	0,3422	0,3585
	1,25	0,2070	0,2244	0,2410	0,2572	0,2732	0,2892	0,3052	0,3213	0,3374	0,3538
	1,30	0,1994	0,2179	0,2352	0,2518	0,2681	0,2843	0,3005	0,3166	0,3329	0,3494
	1,35	0,1909	0,2113	0,2294	0,2465	0,2632	0,2796	0,2959	0,3123	0,3287	0,3452
	1,40	0,1801	0,2043	0,2236	0,2413	0,2584	0,2751	0,2916	0,3081	0,3246	0,3412
	1,45		0,1966	0,2176	0,2362	0,2537	0,2707	0,2874	0,3041	0,3207	0,3375
	1,50		0,1870	0,2114	0,2310	0,2491	0,2664	0,2834	0,3002	0,3170	0,3338
0,2	1,00	0,2702	0,2852	0,3003	0,3155	0,3308	0,3462	0,3618	0,3776	0,3936	0,4100
	1,05	0,2610	0,2764	0,2917	0,3071	0,3225	0,3381	0,3538	0,3697	0,3858	0,4023
	1,10	0,2519	0,2676	0,2833	0,2989	0,3146	0,3303	0,3462	0,3622	0,3785	0,3950
	1,15	0,2425	0,2589	0,2750	0,2909	0,3069	0,3228	0,3389	0,3551	0,3714	0,3880
	1,20	0,2327	0,2500	0,2667	0,2831	0,2994	0,3156	0,3319	0,3482	0,3647	0,3814
	1,25	0,2218	0,2407	0,2583	0,2753	0,2920	0,3086	0,3251	0,3416	0,3583	0,3752
	1,30	0,2084	0,2307	0,2497	0,2675	0,2847	0,3017	0,3185	0,3353	0,3521	0,3691
	1,35	0,1776	0,2188	0,2405	0,2595	0,2775	0,2949	0,3121	0,3291	0,3462	0,3633
	1,40	0,1666	0,1983	0,2301	0,2511	0,2701	0,2882	0,3057	0,3231	0,3404	0,3578
	1,45		0,1638	0,2165	0,2421	0,2625	0,2814	0,2995	0,3173	0,3348	0,3524
	1,50			0,1598	0,2315	0,2546	0,2746	0,2933	0,3115	0,3294	0,3472
0,25	1,00	0,3002	0,3152	0,3302	0,3454	0,3606	0,3761	0,3917	0,4076	0,4238	0,4403
	1,05	0,2900	0,3052	0,3204	0,3358	0,3512	0,3668	0,3826	0,3985	0,4148	0,4314
	1,10	0,2798	0,2953	0,3108	0,3264	0,3420	0,3578	0,3737	0,3898	0,4061	0,4228
	1,15	0,2693	0,2853	0,3012	0,3171	0,3330	0,3490	0,3651	0,3814	0,3979	0,4146
	1,20	0,2583	0,2751	0,2916	0,3079	0,3241	0,3404	0,3567	0,3732	0,3898	0,4068
	1,25	0,2462	0,2643	0,2817	0,2986	0,3153	0,3319	0,3485	0,3652	0,3821	0,3992
	1,30	0,2312	0,2524	0,2712	0,2891	0,3064	0,3235	0,3405	0,3575	0,3745	0,3918
	1,35	0,2162	0,2377	0,2597	0,2790	0,2973	0,3150	0,3325	0,3498	0,3672	0,3847
	1,40	0,2097	0,2171	0,2457	0,2681	0,2878	0,3064	0,3245	0,3422	0,3599	0,3777
	1,45	0,2009	0,2102	0,2181	0,2552	0,2776	0,2975	0,3164	0,3347	0,3528	0,3709
	1,50	######	0,1988	0,2106	0,2340	0,2659	0,2880	0,3081	0,3271	0,3457	0,3642
0,3	1,00	0,3299	0,3448	0,3598	0,3749	0,3901	0,4055	0,4212	0,4370	0,4532	0,4700
	1,05	0,3194	0,3344	0,3495	0,3647	0,3801	0,3956	0,4113	0,4273	0,4436	0,4603
	1,10	0,3089	0,3241	0,3394	0,3547	0,3702	0,3859	0,4017	0,4178	0,4342	0,4510
	1,15	0,2981	0,3137	0,3292	0,3448	0,3605	0,3764	0,3924	0,4086	0,4251	0,4420
	1,20	0,2870	0,3030	0,3190	0,3349	0,3509	0,3670	0,3832	0,3996	0,4162	0,4332
	1,25	0,2751	0,2920	0,3085	0,3249	0,3413	0,3577	0,3741	0,3908	0,4076	0,4247
	1,30	0,2616	0,2800	0,2975	0,3146	0,3315	0,3483	0,3651	0,3820	0,3991	0,4164
	1,35	0,2519	0,2662	0,2856	0,3038	0,3215	0,3389	0,3561	0,3734	0,3907	0,4083
	1,40	0,2463	0,2531	0,2717	0,2921	0,3110	0,3292	0,3470	0,3647	0,3824	0,4003
	1,45	0,2402	0,2473	0,2542	0,2783	0,2995	0,3190	0,3377	0,3560	0,3741	0,3923
	1,50	0,2327	0,2407	0,2482	0,2578	0,2862	0,3080	0,3279	0,3471	0,3658	0,3844

μ_{lu} pour S 500 B ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 12

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2249	0,2380	0,2514	0,2650	0,2788	0,2928	0,3071	0,3217	0,3366	0,3517
0,05	1,00	0,2330	0,2471	0,2614	0,2759	0,2906	0,3054	0,3205	0,3358	0,3514	0,3673
	1,05	0,2315	0,2456	0,2599	0,2744	0,2890	0,3039	0,3190	0,3343	0,3499	0,3658
	1,10	0,2300	0,2442	0,2585	0,2730	0,2876	0,3025	0,3176	0,3329	0,3485	0,3644
	1,15	0,2287	0,2429	0,2572	0,2717	0,2864	0,3012	0,3163	0,3317	0,3473	0,3631
	1,20	0,2275	0,2417	0,2560	0,2705	0,2852	0,3001	0,3152	0,3305	0,3461	0,3620
	1,25	0,2264	0,2406	0,2549	0,2694	0,2841	0,2990	0,3141	0,3294	0,3450	0,3609
	1,30	0,2254	0,2396	0,2539	0,2684	0,2831	0,2980	0,3131	0,3284	0,3440	0,3599
	1,35	0,2245	0,2386	0,2530	0,2675	0,2822	0,2971	0,3122	0,3275	0,3431	0,3590
	1,40	0,2236	0,2377	0,2521	0,2666	0,2813	0,2962	0,3113	0,3266	0,3422	0,3581
	1,45	0,2227	0,2369	0,2513	0,2658	0,2805	0,2954	0,3105	0,3258	0,3414	0,3573
	1,50	0,2219	0,2361	0,2505	0,2650	0,2797	0,2946	0,3097	0,3251	0,3407	0,3566
0,1	1,00	0,2448	0,2600	0,2751	0,2904	0,3059	0,3215	0,3372	0,3532	0,3694	0,3859
	1,05	0,2412	0,2564	0,2717	0,2870	0,3025	0,3182	0,3340	0,3500	0,3662	0,3827
	1,10	0,2378	0,2531	0,2685	0,2839	0,2994	0,3151	0,3309	0,3470	0,3632	0,3798
	1,15	0,2347	0,2501	0,2655	0,2810	0,2966	0,3123	0,3281	0,3442	0,3605	0,3771
	1,20	0,2317	0,2472	0,2627	0,2783	0,2939	0,3096	0,3256	0,3417	0,3580	0,3746
	1,25	0,2289	0,2445	0,2601	0,2757	0,2914	0,3072	0,3231	0,3393	0,3556	0,3722
	1,30	0,2262	0,2420	0,2576	0,2733	0,2891	0,3049	0,3209	0,3371	0,3534	0,3701
	1,35	0,2237	0,2396	0,2553	0,2711	0,2869	0,3028	0,3188	0,3350	0,3514	0,3680
	1,40	0,2214	0,2373	0,2532	0,2690	0,2848	0,3008	0,3168	0,3330	0,3495	0,3661
	1,45	0,2191	0,2352	0,2511	0,2670	0,2829	0,2989	0,3150	0,3312	0,3477	0,3644
	1,50	0,2170	0,2331	0,2492	0,2651	0,2811	0,2971	0,3132	0,3295	0,3460	0,3627
0,15	1,00	0,2616	0,2774	0,2932	0,3091	0,3250	0,3411	0,3573	0,3737	0,3904	0,4073
	1,05	0,2555	0,2716	0,2876	0,3036	0,3197	0,3359	0,3522	0,3687	0,3854	0,4025
	1,10	0,2497	0,2661	0,2823	0,2985	0,3148	0,3311	0,3475	0,3641	0,3809	0,3979
	1,15	0,2441	0,2608	0,2773	0,2937	0,3101	0,3265	0,3430	0,3597	0,3766	0,3937
	1,20	0,2386	0,2557	0,2725	0,2891	0,3056	0,3222	0,3388	0,3556	0,3726	0,3898
	1,25	0,2332	0,2508	0,2679	0,2847	0,3014	0,3181	0,3349	0,3518	0,3688	0,3861
	1,30	0,2278	0,2459	0,2634	0,2805	0,2974	0,3143	0,3312	0,3481	0,3652	0,3826
	1,35	0,2224	0,2412	0,2591	0,2765	0,2936	0,3106	0,3276	0,3447	0,3619	0,3793
	1,40	0,2168	0,2366	0,2549	0,2726	0,2900	0,3071	0,3243	0,3414	0,3587	0,3762
	1,45	0,2110	0,2319	0,2508	0,2689	0,2865	0,3038	0,3211	0,3384	0,3557	0,3733
	1,50	0,2047	0,2272	0,2468	0,2653	0,2831	0,3006	0,3180	0,3354	0,3529	0,3705
0,2	1,00	0,2832	0,2993	0,3153	0,3314	0,3475	0,3638	0,3802	0,3968	0,4137	0,4309
	1,05	0,2751	0,2915	0,3078	0,3241	0,3405	0,3569	0,3735	0,3902	0,4072	0,4245
	1,10	0,2670	0,2839	0,3006	0,3172	0,3338	0,3504	0,3671	0,3840	0,4011	0,4186
	1,15	0,2588	0,2763	0,2935	0,3105	0,3273	0,3442	0,3611	0,3781	0,3954	0,4129
	1,20	0,2504	0,2688	0,2865	0,3039	0,3211	0,3382	0,3553	0,3725	0,3899	0,4075
	1,25	0,2414	0,2611	0,2796	0,2975	0,3150	0,3324	0,3498	0,3672	0,3847	0,4025
	1,30	0,2313	0,2532	0,2727	0,2912	0,3092	0,3269	0,3445	0,3621	0,3797	0,3976
	1,35	0,2180	0,2446	0,2656	0,2849	0,3034	0,3215	0,3393	0,3572	0,3750	0,3930
	1,40		0,2347	0,2582	0,2786	0,2977	0,3162	0,3344	0,3524	0,3705	0,3887
	1,45		0,2210	0,2503	0,2722	0,2921	0,3111	0,3296	0,3479	0,3661	0,3845
	1,50			0,2412	0,2655	0,2864	0,3060	0,3249	0,3435	0,3619	0,3804
0,25	1,00	0,3084	0,3242	0,3401	0,3561	0,3722	0,3884	0,4047	0,4213	0,4383	0,4557
	1,05	0,2988	0,3151	0,3313	0,3475	0,3638	0,3802	0,3968	0,4136	0,4306	0,4481
	1,10	0,2893	0,3060	0,3226	0,3392	0,3558	0,3724	0,3892	0,4061	0,4233	0,4409
	1,15	0,2794	0,2968	0,3140	0,3310	0,3479	0,3648	0,3818	0,3990	0,4163	0,4341
	1,20	0,2688	0,2874	0,3053	0,3228	0,3402	0,3574	0,3747	0,3921	0,4096	0,4275
	1,25	0,2570	0,2775	0,2965	0,3147	0,3325	0,3502	0,3678	0,3854	0,4032	0,4212
	1,30	0,2415	0,2665	0,2872	0,3064	0,3249	0,3430	0,3610	0,3789	0,3970	0,4152
	1,35	0,2153	0,2529	0,2771	0,2978	0,3172	0,3360	0,3544	0,3726	0,3909	0,4094
	1,40	0,2031	0,2164	0,2654	0,2887	0,3094	0,3289	0,3478	0,3665	0,3850	0,4037
	1,45		0,1999	0,2483	0,2786	0,3012	0,3217	0,3413	0,3604	0,3793	0,3983
	1,50			0,1946	0,2662	0,2924	0,3144	0,3348	0,3544	0,3737	0,3929
0,3	1,00	0,3346	0,3502	0,3658	0,3816	0,3974	0,4134	0,4296	0,4461	0,4630	0,4803
	1,05	0,3246	0,3404	0,3563	0,3723	0,3884	0,4046	0,4209	0,4376	0,4546	0,4723
	1,10	0,3144	0,3306	0,3469	0,3631	0,3795	0,3959	0,4125	0,4293	0,4465	0,4642
	1,15	0,3038	0,3207	0,3374	0,3541	0,3707	0,3874	0,4043	0,4213	0,4386	0,4565
	1,20	0,2927	0,3104	0,3278	0,3449	0,3620	0,3791	0,3962	0,4135	0,4310	0,4490
	1,25	0,2802	0,2995	0,3178	0,3357	0,3533	0,3708	0,3883	0,4058	0,4236	0,4418
	1,30	0,2645	0,2872	0,3072	0,3261	0,3445	0,3625	0,3804	0,3983	0,4164	0,4347
	1,35	0,2514	0,2719	0,2955	0,3160	0,3354	0,3541	0,3726	0,3909	0,4093	0,4279
	1,40	0,2443	0,2527	0,2810	0,3049	0,3259	0,3456	0,3647	0,3835	0,4023	0,4212
	1,45	0,2335	0,2449	0,2540	0,2917	0,3156	0,3367	0,3567	0,3761	0,3954	0,4146
	1,50		0,2296	0,2456	0,2698	0,3037	0,3273	0,3485	0,3687	0,3885	0,4081

μ_{lu} pour S 500 B ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 15

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2481	0,2620	0,2761	0,2905	0,3050	0,3198	0,3349	0,3502	0,3658	0,3817
0,05	1,00	0,2548	0,2696	0,2845	0,2996	0,3148	0,3303	0,3460	0,3619	0,3782	0,3947
	1,05	0,2535	0,2683	0,2832	0,2983	0,3136	0,3290	0,3447	0,3607	0,3769	0,3935
	1,10	0,2523	0,2671	0,2820	0,2971	0,3124	0,3279	0,3436	0,3595	0,3758	0,3923
	1,15	0,2512	0,2660	0,2810	0,2961	0,3114	0,3268	0,3425	0,3585	0,3747	0,3913
	1,20	0,2502	0,2650	0,2800	0,2951	0,3104	0,3259	0,3416	0,3575	0,3738	0,3903
	1,25	0,2493	0,2641	0,2791	0,2942	0,3095	0,3250	0,3407	0,3566	0,3729	0,3894
	1,30	0,2485	0,2633	0,2782	0,2933	0,3086	0,3241	0,3399	0,3558	0,3721	0,3886
	1,35	0,2477	0,2625	0,2774	0,2926	0,3079	0,3234	0,3391	0,3551	0,3713	0,3879
	1,40	0,2469	0,2617	0,2767	0,2918	0,3071	0,3227	0,3384	0,3543	0,3706	0,3872
	1,45	0,2462	0,2610	0,2760	0,2912	0,3065	0,3220	0,3377	0,3537	0,3699	0,3865
	1,50	0,2456	0,2604	0,2754	0,2905	0,3058	0,3214	0,3371	0,3531	0,3693	0,3859
0,1	1,00	0,2642	0,2799	0,2956	0,3114	0,3273	0,3434	0,3597	0,3762	0,3929	0,4100
	1,05	0,2612	0,2769	0,2927	0,3085	0,3245	0,3407	0,3570	0,3735	0,3903	0,4074
	1,10	0,2584	0,2742	0,2900	0,3059	0,3220	0,3381	0,3545	0,3710	0,3878	0,4050
	1,15	0,2558	0,2717	0,2876	0,3035	0,3196	0,3358	0,3522	0,3688	0,3856	0,4028
	1,20	0,2534	0,2693	0,2853	0,3013	0,3174	0,3336	0,3501	0,3667	0,3835	0,4007
	1,25	0,2511	0,2671	0,2831	0,2992	0,3154	0,3316	0,3481	0,3647	0,3816	0,3988
	1,30	0,2490	0,2651	0,2811	0,2973	0,3135	0,3298	0,3462	0,3629	0,3798	0,3970
	1,35	0,2470	0,2631	0,2793	0,2954	0,3117	0,3280	0,3445	0,3612	0,3781	0,3954
	1,40	0,2451	0,2613	0,2775	0,2937	0,3100	0,3264	0,3429	0,3596	0,3766	0,3938
	1,45	0,2433	0,2596	0,2759	0,2921	0,3084	0,3248	0,3414	0,3581	0,3751	0,3924
	1,50	0,2417	0,2580	0,2743	0,2906	0,3070	0,3234	0,3400	0,3567	0,3737	0,3910
0,15	1,00	0,2774	0,2937	0,3100	0,3264	0,3428	0,3593	0,3760	0,3929	0,4100	0,4276
	1,05	0,2723	0,2888	0,3053	0,3218	0,3384	0,3550	0,3718	0,3887	0,4060	0,4235
	1,10	0,2674	0,2842	0,3009	0,3175	0,3342	0,3510	0,3678	0,3849	0,4022	0,4198
	1,15	0,2628	0,2798	0,2967	0,3135	0,3303	0,3472	0,3641	0,3813	0,3986	0,4163
	1,20	0,2584	0,2757	0,2928	0,3097	0,3267	0,3436	0,3607	0,3779	0,3953	0,4131
	1,25	0,2541	0,2717	0,2890	0,3062	0,3232	0,3403	0,3575	0,3747	0,3922	0,4100
	1,30	0,2499	0,2679	0,2854	0,3028	0,3200	0,3372	0,3544	0,3718	0,3893	0,4072
	1,35	0,2459	0,2642	0,2820	0,2995	0,3169	0,3342	0,3515	0,3690	0,3866	0,4045
	1,40	0,2419	0,2607	0,2788	0,2965	0,3140	0,3314	0,3488	0,3664	0,3841	0,4020
	1,45	0,2380	0,2573	0,2756	0,2935	0,3112	0,3287	0,3463	0,3639	0,3816	0,3996
	1,50	0,2341	0,2539	0,2726	0,2907	0,3085	0,3262	0,3438	0,3615	0,3793	0,3974
0,2	1,00	0,2948	0,3114	0,3280	0,3446	0,3612	0,3779	0,3948	0,4118	0,4292	0,4470
	1,05	0,2876	0,3046	0,3215	0,3383	0,3552	0,3721	0,3891	0,4063	0,4238	0,4417
	1,10	0,2806	0,2980	0,3153	0,3324	0,3494	0,3665	0,3837	0,4011	0,4187	0,4367
	1,15	0,2736	0,2916	0,3092	0,3267	0,3440	0,3613	0,3786	0,3961	0,4139	0,4319
	1,20	0,2665	0,2853	0,3034	0,3212	0,3387	0,3563	0,3738	0,3915	0,4093	0,4275
	1,25	0,2593	0,2790	0,2977	0,3158	0,3337	0,3515	0,3692	0,3870	0,4050	0,4233
	1,30	0,2517	0,2726	0,2920	0,3107	0,3289	0,3469	0,3649	0,3828	0,4009	0,4193
	1,35	0,2434	0,2662	0,2865	0,3056	0,3242	0,3425	0,3607	0,3788	0,3971	0,4156
	1,40	0,2334	0,2594	0,2809	0,3007	0,3197	0,3383	0,3567	0,3750	0,3934	0,4120
	1,45		0,2522	0,2752	0,2958	0,3153	0,3342	0,3528	0,3713	0,3899	0,4086
	1,50		0,2439	0,2694	0,2909	0,3110	0,3302	0,3491	0,3678	0,3865	0,4054
0,25	1,00	0,3159	0,3323	0,3488	0,3653	0,3818	0,3985	0,4153	0,4323	0,4497	0,4678
	1,05	0,3071	0,3241	0,3409	0,3577	0,3745	0,3914	0,4084	0,4256	0,4432	0,4613
	1,10	0,2983	0,3159	0,3332	0,3503	0,3675	0,3846	0,4018	0,4193	0,4370	0,4552
	1,15	0,2893	0,3077	0,3255	0,3431	0,3606	0,3780	0,3955	0,4132	0,4310	0,4494
	1,20	0,2798	0,2993	0,3179	0,3360	0,3539	0,3717	0,3894	0,4073	0,4254	0,4439
	1,25	0,2692	0,2906	0,3102	0,3290	0,3474	0,3655	0,3836	0,4017	0,4199	0,4386
	1,30	0,2562	0,2812	0,3023	0,3220	0,3409	0,3595	0,3779	0,3962	0,4147	0,4335
	1,35	0,2137	0,2704	0,2940	0,3148	0,3345	0,3536	0,3723	0,3910	0,4097	0,4287
	1,40		0,2556	0,2849	0,3075	0,3281	0,3477	0,3669	0,3859	0,4049	0,4240
	1,45			0,2743	0,2998	0,3216	0,3420	0,3616	0,3810	0,4002	0,4196
	1,50			0,2587	0,2914	0,3149	0,3362	0,3564	0,3761	0,3957	0,4153
0,3	1,00	0,3390	0,3551	0,3712	0,3874	0,4037	0,4200	0,4366	0,4535	0,4708	0,4839
	1,05	0,3295	0,3460	0,3625	0,3790	0,3955	0,4121	0,4289	0,4460	0,4635	0,4808
	1,10	0,3198	0,3369	0,3538	0,3707	0,3875	0,4044	0,4215	0,4388	0,4564	0,4749
	1,15	0,3097	0,3276	0,3451	0,3624	0,3797	0,3969	0,4143	0,4318	0,4497	0,4682
	1,20	0,2989	0,3179	0,3362	0,3542	0,3719	0,3895	0,4072	0,4250	0,4431	0,4617
	1,25	0,2865	0,3076	0,3271	0,3458	0,3641	0,3822	0,4003	0,4184	0,4367	0,4555
	1,30	0,2696	0,2959	0,3174	0,3373	0,3563	0,3750	0,3935	0,4119	0,4305	0,4496
	1,35	0,2506	0,2809	0,3066	0,3283	0,3484	0,3677	0,3867	0,4056	0,4245	0,4438
	1,40	0,2395	0,2521	0,2936	0,3186	0,3402	0,3604	0,3800	0,3993	0,4186	0,4381
	1,45		0,2380	0,2538	0,3074	0,3314	0,3529	0,3733	0,3932	0,4128	0,4326
	1,50			0,2356	0,2925	0,3219	0,3452	0,3665	0,3870	0,4072	0,4273

μ_{lu} pour S 500 B ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 18

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2662	0,2806	0,2952	0,3101	0,3251	0,3404	0,3559	0,3717	0,3878	0,4043
0,05	1,00	0,2719	0,2870	0,3024	0,3178	0,3335	0,3494	0,3654	0,3818	0,3984	0,4154
	1,05	0,2708	0,2859	0,3013	0,3168	0,3324	0,3483	0,3644	0,3807	0,3973	0,4143
	1,10	0,2698	0,2849	0,3003	0,3158	0,3314	0,3473	0,3634	0,3797	0,3964	0,4134
	1,15	0,2688	0,2840	0,2994	0,3149	0,3305	0,3464	0,3625	0,3788	0,3955	0,4125
	1,20	0,2680	0,2832	0,2985	0,3140	0,3297	0,3456	0,3617	0,3780	0,3947	0,4117
	1,25	0,2672	0,2824	0,2977	0,3133	0,3289	0,3448	0,3609	0,3773	0,3939	0,4109
	1,30	0,2665	0,2817	0,2970	0,3125	0,3282	0,3441	0,3602	0,3766	0,3932	0,4102
	1,35	0,2658	0,2810	0,2963	0,3119	0,3276	0,3435	0,3596	0,3759	0,3926	0,4096
	1,40	0,2651	0,2804	0,2957	0,3113	0,3270	0,3429	0,3590	0,3753	0,3920	0,4090
	1,45	0,2645	0,2798	0,2951	0,3107	0,3264	0,3423	0,3584	0,3748	0,3914	0,4084
	1,50	0,2640	0,2792	0,2946	0,3101	0,3259	0,3418	0,3579	0,3742	0,3909	0,4079
0,1	1,00	0,2797	0,2956	0,3116	0,3278	0,3440	0,3604	0,3769	0,3938	0,4109	0,4284
	1,05	0,2771	0,2931	0,3092	0,3253	0,3416	0,3581	0,3747	0,3915	0,4086	0,4261
	1,10	0,2748	0,2908	0,3069	0,3231	0,3395	0,3559	0,3726	0,3894	0,4066	0,4241
	1,15	0,2726	0,2887	0,3048	0,3211	0,3374	0,3539	0,3706	0,3875	0,4047	0,4222
	1,20	0,2705	0,2867	0,3029	0,3192	0,3356	0,3521	0,3688	0,3857	0,4029	0,4205
	1,25	0,2686	0,2848	0,3011	0,3174	0,3339	0,3504	0,3672	0,3841	0,4013	0,4189
	1,30	0,2668	0,2831	0,2994	0,3158	0,3323	0,3489	0,3656	0,3826	0,3998	0,4174
	1,35	0,2652	0,2815	0,2979	0,3143	0,3308	0,3474	0,3642	0,3811	0,3984	0,4160
	1,40	0,2636	0,2800	0,2964	0,3128	0,3294	0,3460	0,3628	0,3798	0,3971	0,4147
	1,45	0,2621	0,2786	0,2950	0,3115	0,3280	0,3447	0,3615	0,3786	0,3959	0,4135
	1,50	0,2607	0,2772	0,2937	0,3102	0,3268	0,3435	0,3604	0,3774	0,3947	0,4124
0,15	1,00	0,2904	0,3070	0,3236	0,3402	0,3569	0,3737	0,3906	0,4078	0,4253	0,4432
	1,05	0,2861	0,3028	0,3196	0,3363	0,3531	0,3700	0,3870	0,4043	0,4218	0,4398
	1,10	0,2819	0,2989	0,3158	0,3327	0,3496	0,3666	0,3837	0,4010	0,4186	0,4366
	1,15	0,2780	0,2952	0,3123	0,3293	0,3463	0,3634	0,3806	0,3979	0,4156	0,4336
	1,20	0,2743	0,2917	0,3090	0,3261	0,3432	0,3604	0,3777	0,3951	0,4128	0,4309
	1,25	0,2708	0,2884	0,3058	0,3231	0,3403	0,3576	0,3749	0,3925	0,4102	0,4284
	1,30	0,2674	0,2853	0,3028	0,3202	0,3376	0,3550	0,3724	0,3900	0,4078	0,4260
	1,35	0,2642	0,2823	0,3000	0,3176	0,3350	0,3525	0,3700	0,3876	0,4055	0,4237
	1,40	0,2611	0,2794	0,2973	0,3150	0,3326	0,3501	0,3677	0,3855	0,4034	0,4216
	1,45	0,2580	0,2767	0,2948	0,3126	0,3303	0,3479	0,3656	0,3834	0,4014	0,4197
	1,50	0,2551	0,2741	0,2924	0,3103	0,3281	0,3458	0,3636	0,3814	0,3995	0,4178
0,2	1,00	0,3047	0,3217	0,3386	0,3555	0,3723	0,3893	0,4064	0,4238	0,4414	0,4597
	1,05	0,2984	0,3158	0,3329	0,3500	0,3671	0,3843	0,4015	0,4190	0,4368	0,4551
	1,10	0,2923	0,3101	0,3275	0,3449	0,3622	0,3795	0,3969	0,4145	0,4324	0,4508
	1,15	0,2863	0,3045	0,3224	0,3400	0,3575	0,3750	0,3926	0,4103	0,4283	0,4468
	1,20	0,2804	0,2992	0,3174	0,3353	0,3530	0,3708	0,3885	0,4064	0,4245	0,4430
	1,25	0,2745	0,2939	0,3126	0,3308	0,3488	0,3667	0,3846	0,4026	0,4209	0,4395
	1,30	0,2685	0,2887	0,3079	0,3265	0,3447	0,3629	0,3809	0,3991	0,4174	0,4361
	1,35	0,2623	0,2836	0,3033	0,3223	0,3409	0,3592	0,3774	0,3957	0,4142	0,4330
	1,40	0,2558	0,2784	0,2989	0,3183	0,3371	0,3557	0,3741	0,3925	0,4111	0,4300
	1,45	0,2486	0,2732	0,2945	0,3143	0,3335	0,3523	0,3709	0,3895	0,4082	0,4272
	1,50	0,2401	0,2679	0,2901	0,3105	0,3300	0,3491	0,3679	0,3866	0,4054	0,4245
0,25	1,00	0,3226	0,3395	0,3563	0,3731	0,3900	0,4069	0,4239	0,4412	0,4590	0,4776
	1,05	0,3147	0,3321	0,3493	0,3664	0,3835	0,4006	0,4179	0,4354	0,4533	0,4719
	1,10	0,3067	0,3247	0,3424	0,3599	0,3773	0,3947	0,4122	0,4299	0,4479	0,4666
	1,15	0,2987	0,3174	0,3356	0,3535	0,3713	0,3890	0,4067	0,4246	0,4428	0,4616
	1,20	0,2902	0,3100	0,3289	0,3473	0,3655	0,3835	0,4015	0,4196	0,4379	0,4568
	1,25	0,2812	0,3025	0,3223	0,3413	0,3598	0,3782	0,3964	0,4148	0,4333	0,4523
	1,30	0,2708	0,2946	0,3156	0,3353	0,3543	0,3730	0,3916	0,4101	0,4289	0,4480
	1,35	0,2565	0,2861	0,3087	0,3293	0,3489	0,3680	0,3869	0,4057	0,4246	0,4439
	1,40		0,2762	0,3015	0,3233	0,3436	0,3631	0,3824	0,4014	0,4206	0,4400
	1,45		0,2624	0,2938	0,3171	0,3383	0,3584	0,3780	0,3973	0,4167	0,4363
	1,50			0,2851	0,3108	0,3330	0,3537	0,3737	0,3933	0,4129	0,4327
0,3	1,00	0,3431	0,3595	0,3760	0,3925	0,4090	0,4256	0,4424	0,4595	0,4772	0,4868
	1,05	0,3341	0,3511	0,3680	0,3848	0,4016	0,4186	0,4356	0,4529	0,4708	0,4840
	1,10	0,3250	0,3427	0,3600	0,3773	0,3945	0,4117	0,4290	0,4466	0,4646	0,4815
	1,15	0,3156	0,3341	0,3521	0,3698	0,3874	0,4050	0,4226	0,4404	0,4586	0,4778
	1,20	0,3053	0,3252	0,3440	0,3624	0,3805	0,3985	0,4164	0,4345	0,4529	0,4721
	1,25	0,2936	0,3157	0,3358	0,3550	0,3736	0,3920	0,4104	0,4288	0,4474	0,4667
	1,30	0,2775	0,3051	0,3271	0,3474	0,3668	0,3857	0,4045	0,4232	0,4421	0,4615
	1,35	0,2494	0,2919	0,3177	0,3395	0,3599	0,3794	0,3986	0,4177	0,4369	0,4566
	1,40		0,2510	0,3068	0,3312	0,3528	0,3732	0,3929	0,4124	0,4319	0,4518
	1,45			0,2919	0,3222	0,3455	0,3668	0,3872	0,4072	0,4270	0,4471
	1,50				0,3115	0,3378	0,3604	0,3816	0,4020	0,4222	0,4426

μ_{lu} pour S 500 B ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 21

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2807	0,2955	0,3104	0,3256	0,3410	0,3566	0,3724	0,3885	0,4049	0,4217
0,05	1,00	0,2856	0,3010	0,3166	0,3324	0,3483	0,3643	0,3807	0,3972	0,4141	0,4314
	1,05	0,2846	0,3001	0,3157	0,3314	0,3473	0,3634	0,3797	0,3963	0,4132	0,4305
	1,10	0,2837	0,2992	0,3148	0,3305	0,3465	0,3626	0,3789	0,3955	0,4124	0,4297
	1,15	0,2829	0,2984	0,3140	0,3298	0,3457	0,3618	0,3781	0,3947	0,4116	0,4290
	1,20	0,2822	0,2977	0,3133	0,3290	0,3450	0,3611	0,3774	0,3940	0,4109	0,4283
	1,25	0,2815	0,2970	0,3126	0,3284	0,3443	0,3604	0,3768	0,3934	0,4103	0,4276
	1,30	0,2809	0,2963	0,3120	0,3277	0,3437	0,3598	0,3762	0,3928	0,4097	0,4270
	1,35	0,2803	0,2958	0,3114	0,3272	0,3431	0,3592	0,3756	0,3922	0,4091	0,4265
	1,40	0,2797	0,2952	0,3108	0,3266	0,3426	0,3587	0,3751	0,3917	0,4086	0,4259
	1,45	0,2792	0,2947	0,3103	0,3261	0,3421	0,3582	0,3746	0,3912	0,4081	0,4255
	1,50	0,2787	0,2942	0,3099	0,3257	0,3416	0,3578	0,3741	0,3907	0,4077	0,4250
0,1	1,00	0,2922	0,3084	0,3246	0,3409	0,3573	0,3738	0,3906	0,4076	0,4249	0,4427
	1,05	0,2900	0,3062	0,3224	0,3388	0,3552	0,3718	0,3886	0,4056	0,4230	0,4408
	1,10	0,2880	0,3042	0,3205	0,3369	0,3533	0,3700	0,3868	0,4038	0,4212	0,4390
	1,15	0,2861	0,3023	0,3187	0,3351	0,3516	0,3683	0,3851	0,4022	0,4196	0,4374
	1,20	0,2843	0,3006	0,3170	0,3335	0,3500	0,3667	0,3836	0,4007	0,4181	0,4359
	1,25	0,2827	0,2990	0,3154	0,3319	0,3485	0,3652	0,3821	0,3993	0,4167	0,4346
	1,30	0,2811	0,2975	0,3140	0,3305	0,3471	0,3639	0,3808	0,3980	0,4154	0,4333
	1,35	0,2797	0,2962	0,3127	0,3292	0,3458	0,3626	0,3796	0,3967	0,4142	0,4321
	1,40	0,2784	0,2949	0,3114	0,3280	0,3446	0,3614	0,3784	0,3956	0,4131	0,4310
	1,45	0,2771	0,2936	0,3102	0,3268	0,3435	0,3603	0,3773	0,3945	0,4120	0,4299
	1,50	0,2759	0,2925	0,3091	0,3257	0,3425	0,3593	0,3763	0,3935	0,4110	0,4290
0,15	1,00	0,3013	0,3180	0,3347	0,3515	0,3683	0,3852	0,4023	0,4196	0,4373	0,4555
	1,05	0,2975	0,3144	0,3312	0,3481	0,3650	0,3820	0,3992	0,4166	0,4343	0,4525
	1,10	0,2939	0,3110	0,3280	0,3449	0,3620	0,3791	0,3963	0,4138	0,4315	0,4498
	1,15	0,2905	0,3078	0,3249	0,3420	0,3591	0,3763	0,3936	0,4111	0,4290	0,4473
	1,20	0,2874	0,3048	0,3220	0,3392	0,3565	0,3737	0,3911	0,4087	0,4266	0,4449
	1,25	0,2844	0,3020	0,3194	0,3367	0,3540	0,3713	0,3888	0,4064	0,4244	0,4427
	1,30	0,2815	0,2993	0,3168	0,3342	0,3516	0,3691	0,3866	0,4043	0,4223	0,4407
	1,35	0,2788	0,2968	0,3144	0,3320	0,3494	0,3670	0,3845	0,4023	0,4203	0,4388
	1,40	0,2762	0,2943	0,3122	0,3298	0,3474	0,3650	0,3826	0,4004	0,4185	0,4370
	1,45	0,2738	0,2921	0,3100	0,3278	0,3454	0,3631	0,3808	0,3987	0,4168	0,4353
	1,50	0,2714	0,2899	0,3080	0,3258	0,3436	0,3613	0,3791	0,3970	0,4152	0,4337
0,2	1,00	0,3133	0,3304	0,3475	0,3645	0,3815	0,3986	0,4159	0,4334	0,4512	0,4698
	1,05	0,3077	0,3252	0,3425	0,3597	0,3770	0,3942	0,4116	0,4292	0,4472	0,4658
	1,10	0,3024	0,3202	0,3378	0,3552	0,3726	0,3901	0,4076	0,4253	0,4434	0,4621
	1,15	0,2972	0,3154	0,3333	0,3510	0,3686	0,3862	0,4039	0,4217	0,4399	0,4586
	1,20	0,2921	0,3108	0,3290	0,3469	0,3647	0,3825	0,4003	0,4183	0,4366	0,4554
	1,25	0,2871	0,3063	0,3248	0,3430	0,3611	0,3790	0,3970	0,4151	0,4334	0,4523
	1,30	0,2822	0,3019	0,3209	0,3394	0,3576	0,3757	0,3938	0,4120	0,4305	0,4494
	1,35	0,2773	0,2977	0,3170	0,3358	0,3543	0,3726	0,3908	0,4092	0,4277	0,4467
	1,40	0,2723	0,2935	0,3133	0,3324	0,3511	0,3696	0,3880	0,4064	0,4251	0,4442
	1,45	0,2672	0,2894	0,3097	0,3291	0,3481	0,3667	0,3853	0,4039	0,4226	0,4418
	1,50	0,2620	0,2853	0,3062	0,3260	0,3452	0,3640	0,3827	0,4014	0,4203	0,4395
0,25	1,00	0,3287	0,3458	0,3628	0,3798	0,3968	0,4139	0,4311	0,4485	0,4665	0,4822
	1,05	0,3215	0,3391	0,3565	0,3738	0,3910	0,4083	0,4257	0,4434	0,4615	0,4802
	1,10	0,3143	0,3325	0,3503	0,3680	0,3855	0,4031	0,4207	0,4385	0,4568	0,4758
	1,15	0,3071	0,3260	0,3443	0,3624	0,3802	0,3981	0,4159	0,4339	0,4523	0,4714
	1,20	0,2997	0,3195	0,3385	0,3569	0,3752	0,3932	0,4113	0,4295	0,4481	0,4673
	1,25	0,2919	0,3130	0,3327	0,3516	0,3702	0,3886	0,4070	0,4254	0,4441	0,4634
	1,30	0,2835	0,3063	0,3269	0,3465	0,3655	0,3842	0,4028	0,4214	0,4402	0,4596
	1,35	0,2736	0,2993	0,3211	0,3414	0,3608	0,3799	0,3987	0,4176	0,4366	0,4561
	1,40	0,2590	0,2919	0,3153	0,3363	0,3563	0,3757	0,3949	0,4139	0,4331	0,4528
	1,45		0,2834	0,3092	0,3313	0,3519	0,3717	0,3911	0,4104	0,4298	0,4496
	1,50		0,2725	0,3029	0,3262	0,3475	0,3678	0,3875	0,4070	0,4266	0,4465
0,3	1,00	0,3468	0,3636	0,3802	0,3969	0,4136	0,4304	0,4473	0,4646	0,4811	0,4891
	1,05	0,3385	0,3558	0,3729	0,3899	0,4069	0,4240	0,4412	0,4587	0,4768	0,4867
	1,10	0,3300	0,3479	0,3656	0,3831	0,4005	0,4178	0,4353	0,4530	0,4713	0,4844
	1,15	0,3211	0,3400	0,3584	0,3763	0,3941	0,4119	0,4296	0,4476	0,4660	0,4823
	1,20	0,3117	0,3319	0,3511	0,3697	0,3879	0,4061	0,4242	0,4424	0,4610	0,4803
	1,25	0,3009	0,3233	0,3437	0,3630	0,3818	0,4004	0,4188	0,4374	0,4562	0,4759
	1,30	0,2869	0,3140	0,3360	0,3563	0,3758	0,3948	0,4136	0,4325	0,4515	0,4714
	1,35	0,2470	0,3029	0,3278	0,3495	0,3698	0,3893	0,4086	0,4277	0,4471	0,4670
	1,40		0,2862	0,3188	0,3424	0,3637	0,3839	0,4036	0,4231	0,4427	0,4628
	1,45			0,3081	0,3349	0,3575	0,3785	0,3988	0,4186	0,4385	0,4588
	1,50			0,2904	0,3267	0,3512	0,3731	0,3940	0,4143	0,4345	0,4550

μ_{lu} pour S 500 B ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 24

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2925	0,3075	0,3228	0,3381	0,3537	0,3695	0,3856	0,4019	0,4185	0,4356
0,05	1,00	0,2968	0,3125	0,3282	0,3441	0,3602	0,3764	0,3929	0,4096	0,4267	0,4442
	1,05	0,2960	0,3116	0,3274	0,3433	0,3593	0,3756	0,3921	0,4088	0,4259	0,4435
	1,10	0,2952	0,3108	0,3266	0,3425	0,3586	0,3748	0,3913	0,4081	0,4252	0,4427
	1,15	0,2945	0,3101	0,3259	0,3418	0,3579	0,3742	0,3906	0,4074	0,4245	0,4421
	1,20	0,2938	0,3095	0,3252	0,3412	0,3573	0,3735	0,3900	0,4068	0,4239	0,4414
	1,25	0,2932	0,3089	0,3246	0,3406	0,3567	0,3730	0,3895	0,4062	0,4233	0,4409
	1,30	0,2926	0,3083	0,3241	0,3400	0,3561	0,3724	0,3889	0,4057	0,4228	0,4404
	1,35	0,2921	0,3078	0,3236	0,3395	0,3556	0,3719	0,3884	0,4052	0,4223	0,4399
	1,40	0,2916	0,3073	0,3231	0,3391	0,3552	0,3715	0,3880	0,4047	0,4219	0,4394
	1,45	0,2912	0,3069	0,3227	0,3386	0,3547	0,3710	0,3875	0,4043	0,4214	0,4390
	1,50	0,2907	0,3064	0,3222	0,3382	0,3543	0,3706	0,3871	0,4039	0,4210	0,4386
0,1	1,00	0,3026	0,3188	0,3351	0,3515	0,3681	0,3847	0,4016	0,4187	0,4361	0,4542
	1,05	0,3006	0,3169	0,3333	0,3497	0,3663	0,3830	0,3998	0,4170	0,4345	0,4525
	1,10	0,2988	0,3152	0,3315	0,3480	0,3646	0,3813	0,3982	0,4154	0,4329	0,4510
	1,15	0,2972	0,3135	0,3300	0,3465	0,3631	0,3798	0,3968	0,4140	0,4315	0,4495
	1,20	0,2956	0,3120	0,3285	0,3450	0,3617	0,3785	0,3954	0,4126	0,4302	0,4482
	1,25	0,2942	0,3106	0,3271	0,3437	0,3604	0,3772	0,3942	0,4114	0,4290	0,4470
	1,30	0,2928	0,3093	0,3259	0,3425	0,3592	0,3760	0,3930	0,4103	0,4278	0,4459
	1,35	0,2916	0,3081	0,3247	0,3413	0,3580	0,3749	0,3919	0,4092	0,4268	0,4449
	1,40	0,2904	0,3070	0,3236	0,3402	0,3570	0,3739	0,3909	0,4082	0,4258	0,4439
	1,45	0,2893	0,3059	0,3225	0,3392	0,3560	0,3729	0,3900	0,4073	0,4249	0,4430
	1,50	0,2883	0,3049	0,3216	0,3383	0,3551	0,3720	0,3891	0,4064	0,4241	0,4422
0,15	1,00	0,3103	0,3272	0,3440	0,3608	0,3777	0,3947	0,4118	0,4292	0,4470	0,4654
	1,05	0,3070	0,3239	0,3409	0,3578	0,3748	0,3918	0,4091	0,4265	0,4444	0,4628
	1,10	0,3038	0,3210	0,3380	0,3550	0,3721	0,3892	0,4065	0,4241	0,4420	0,4604
	1,15	0,3009	0,3182	0,3353	0,3524	0,3696	0,3868	0,4042	0,4218	0,4397	0,4582
	1,20	0,2982	0,3155	0,3328	0,3500	0,3673	0,3846	0,4020	0,4196	0,4376	0,4562
	1,25	0,2956	0,3131	0,3305	0,3478	0,3651	0,3825	0,4000	0,4177	0,4357	0,4543
	1,30	0,2931	0,3108	0,3282	0,3457	0,3631	0,3805	0,3981	0,4158	0,4339	0,4525
	1,35	0,2908	0,3086	0,3262	0,3437	0,3611	0,3787	0,3963	0,4141	0,4322	0,4508
	1,40	0,2886	0,3065	0,3242	0,3418	0,3593	0,3769	0,3946	0,4125	0,4306	0,4492
	1,45	0,2865	0,3045	0,3224	0,3400	0,3577	0,3753	0,3930	0,4109	0,4291	0,4478
	1,50	0,2845	0,3027	0,3206	0,3384	0,3561	0,3738	0,3915	0,4095	0,4277	0,4464
0,2	1,00	0,3207	0,3379	0,3550	0,3721	0,3892	0,4064	0,4237	0,4412	0,4592	0,4781
	1,05	0,3157	0,3332	0,3506	0,3679	0,3851	0,4025	0,4199	0,4376	0,4557	0,4746
	1,10	0,3110	0,3288	0,3464	0,3639	0,3813	0,3988	0,4164	0,4342	0,4523	0,4713
	1,15	0,3064	0,3246	0,3424	0,3601	0,3777	0,3954	0,4131	0,4310	0,4492	0,4682
	1,20	0,3020	0,3205	0,3386	0,3566	0,3743	0,3921	0,4100	0,4280	0,4463	0,4654
	1,25	0,2977	0,3166	0,3350	0,3532	0,3712	0,3891	0,4070	0,4252	0,4436	0,4627
	1,30	0,2935	0,3129	0,3316	0,3500	0,3681	0,3862	0,4043	0,4225	0,4411	0,4602
	1,35	0,2894	0,3093	0,3283	0,3469	0,3652	0,3835	0,4017	0,4200	0,4386	0,4578
	1,40	0,2854	0,3058	0,3252	0,3440	0,3625	0,3809	0,3992	0,4177	0,4364	0,4556
	1,45	0,2814	0,3024	0,3221	0,3412	0,3599	0,3784	0,3969	0,4154	0,4342	0,4535
	1,50	0,2774	0,2990	0,3192	0,3385	0,3574	0,3761	0,3947	0,4133	0,4322	0,4515
0,25	1,00	0,3340	0,3513	0,3685	0,3855	0,4026	0,4197	0,4370	0,4545	0,4726	0,4849
	1,05	0,3275	0,3452	0,3627	0,3801	0,3974	0,4148	0,4323	0,4500	0,4682	0,4831
	1,10	0,3210	0,3393	0,3572	0,3749	0,3925	0,4101	0,4278	0,4457	0,4640	0,4814
	1,15	0,3145	0,3335	0,3518	0,3699	0,3878	0,4057	0,4235	0,4416	0,4601	0,4796
	1,20	0,3080	0,3277	0,3466	0,3651	0,3833	0,4014	0,4195	0,4378	0,4564	0,4759
	1,25	0,3013	0,3220	0,3415	0,3604	0,3790	0,3973	0,4157	0,4341	0,4529	0,4724
	1,30	0,2943	0,3163	0,3365	0,3559	0,3748	0,3934	0,4120	0,4306	0,4495	0,4691
	1,35	0,2867	0,3105	0,3316	0,3515	0,3708	0,3897	0,4085	0,4273	0,4463	0,4660
	1,40	0,2777	0,3044	0,3266	0,3472	0,3669	0,3861	0,4051	0,4241	0,4433	0,4631
	1,45	0,2649	0,2981	0,3217	0,3429	0,3631	0,3826	0,4019	0,4211	0,4404	0,4603
	1,50		0,2911	0,3166	0,3387	0,3594	0,3793	0,3988	0,4182	0,4377	0,4577
0,3	1,00	0,3502	0,3671	0,3840	0,4008	0,4176	0,4344	0,4515	0,4688	0,4830	0,4911
	1,05	0,3424	0,3599	0,3772	0,3944	0,4115	0,4287	0,4459	0,4635	0,4808	0,4889
	1,10	0,3345	0,3527	0,3705	0,3881	0,4056	0,4231	0,4407	0,4585	0,4769	0,4868
	1,15	0,3264	0,3455	0,3639	0,3820	0,3999	0,4177	0,4356	0,4536	0,4722	0,4849
	1,20	0,3177	0,3381	0,3573	0,3760	0,3943	0,4125	0,4307	0,4490	0,4677	0,4831
	1,25	0,3081	0,3304	0,3507	0,3701	0,3889	0,4075	0,4259	0,4445	0,4635	0,4814
	1,30	0,2962	0,3221	0,3439	0,3641	0,3835	0,4025	0,4214	0,4402	0,4594	0,4795
	1,35	0,2412	0,3128	0,3368	0,3581	0,3782	0,3977	0,4169	0,4360	0,4554	0,4757
	1,40		0,3010	0,3293	0,3520	0,3729	0,3930	0,4126	0,4320	0,4516	0,4720
	1,45			0,3208	0,3457	0,3677	0,3883	0,4083	0,4281	0,4480	0,4685
	1,50			0,3105	0,3391	0,3623	0,3837	0,4042	0,4243	0,4444	0,4651

μ_{lu} pour S 500 B ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 27

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,3023	0,3176	0,3329	0,3485	0,3642	0,3802	0,3963	0,4128	0,4296	0,4469
0,05	1,00	0,3062	0,3219	0,3378	0,3538	0,3700	0,3863	0,4029	0,4197	0,4369	0,4547
	1,05	0,3054	0,3212	0,3371	0,3531	0,3692	0,3856	0,4021	0,4190	0,4362	0,4540
	1,10	0,3047	0,3205	0,3364	0,3524	0,3686	0,3849	0,4015	0,4183	0,4355	0,4533
	1,15	0,3041	0,3198	0,3357	0,3518	0,3679	0,3843	0,4009	0,4177	0,4350	0,4527
	1,20	0,3035	0,3193	0,3352	0,3512	0,3674	0,3837	0,4003	0,4172	0,4344	0,4522
	1,25	0,3029	0,3187	0,3346	0,3507	0,3669	0,3832	0,3998	0,4167	0,4339	0,4517
	1,30	0,3024	0,3182	0,3341	0,3502	0,3664	0,3828	0,3993	0,4162	0,4334	0,4512
	1,35	0,3020	0,3178	0,3337	0,3497	0,3659	0,3823	0,3989	0,4158	0,4330	0,4508
	1,40	0,3015	0,3173	0,3332	0,3493	0,3655	0,3819	0,3985	0,4154	0,4326	0,4504
	1,45	0,3011	0,3169	0,3328	0,3489	0,3651	0,3815	0,3981	0,4150	0,4322	0,4500
	1,50	0,3007	0,3165	0,3325	0,3485	0,3648	0,3812	0,3978	0,4147	0,4319	0,4497
0,1	1,00	0,3113	0,3276	0,3439	0,3604	0,3770	0,3937	0,4106	0,4278	0,4453	0,4635
	1,05	0,3095	0,3259	0,3423	0,3588	0,3754	0,3921	0,4091	0,4263	0,4438	0,4621
	1,10	0,3079	0,3243	0,3407	0,3573	0,3739	0,3907	0,4076	0,4249	0,4425	0,4607
	1,15	0,3064	0,3228	0,3393	0,3559	0,3725	0,3893	0,4063	0,4236	0,4412	0,4594
	1,20	0,3050	0,3215	0,3380	0,3546	0,3713	0,3881	0,4051	0,4224	0,4401	0,4583
	1,25	0,3038	0,3203	0,3368	0,3534	0,3701	0,3870	0,4040	0,4213	0,4390	0,4572
	1,30	0,3026	0,3191	0,3357	0,3523	0,3691	0,3859	0,4030	0,4203	0,4380	0,4562
	1,35	0,3015	0,3180	0,3346	0,3513	0,3681	0,3850	0,4020	0,4194	0,4371	0,4553
	1,40	0,3004	0,3170	0,3336	0,3503	0,3671	0,3840	0,4011	0,4185	0,4362	0,4545
	1,45	0,2994	0,3161	0,3327	0,3494	0,3663	0,3832	0,4003	0,4177	0,4354	0,4537
	1,50	0,2985	0,3152	0,3319	0,3486	0,3654	0,3824	0,3995	0,4169	0,4346	0,4529
0,15	1,00	0,3180	0,3349	0,3517	0,3686	0,3855	0,4025	0,4197	0,4371	0,4550	0,4737
	1,05	0,3150	0,3320	0,3489	0,3659	0,3829	0,4000	0,4172	0,4347	0,4526	0,4713
	1,10	0,3122	0,3293	0,3464	0,3634	0,3805	0,3977	0,4150	0,4325	0,4505	0,4692
	1,15	0,3096	0,3269	0,3440	0,3611	0,3783	0,3955	0,4129	0,4305	0,4485	0,4672
	1,20	0,3072	0,3245	0,3418	0,3590	0,3762	0,3935	0,4110	0,4286	0,4467	0,4654
	1,25	0,3049	0,3224	0,3397	0,3570	0,3743	0,3916	0,4091	0,4269	0,4450	0,4637
	1,30	0,3027	0,3203	0,3377	0,3551	0,3725	0,3899	0,4075	0,4252	0,4434	0,4621
	1,35	0,3007	0,3184	0,3359	0,3534	0,3708	0,3883	0,4059	0,4237	0,4419	0,4606
	1,40	0,2988	0,3166	0,3342	0,3517	0,3692	0,3868	0,4044	0,4223	0,4405	0,4593
	1,45	0,2970	0,3149	0,3326	0,3502	0,3677	0,3853	0,4030	0,4209	0,4392	0,4580
	1,50	0,2952	0,3132	0,3310	0,3487	0,3663	0,3840	0,4017	0,4197	0,4379	0,4568
0,2	1,00	0,3270	0,3443	0,3614	0,3785	0,3957	0,4128	0,4302	0,4478	0,4658	0,4820
	1,05	0,3226	0,3401	0,3575	0,3747	0,3920	0,4093	0,4268	0,4445	0,4627	0,4808
	1,10	0,3183	0,3361	0,3537	0,3712	0,3886	0,4061	0,4237	0,4415	0,4597	0,4789
	1,15	0,3143	0,3324	0,3502	0,3678	0,3854	0,4030	0,4207	0,4386	0,4569	0,4762
	1,20	0,3104	0,3288	0,3468	0,3647	0,3824	0,4001	0,4180	0,4360	0,4544	0,4736
	1,25	0,3066	0,3254	0,3436	0,3617	0,3796	0,3974	0,4154	0,4335	0,4520	0,4712
	1,30	0,3030	0,3221	0,3406	0,3588	0,3769	0,3949	0,4129	0,4312	0,4497	0,4690
	1,35	0,2995	0,3189	0,3377	0,3561	0,3744	0,3925	0,4107	0,4290	0,4476	0,4669
	1,40	0,2961	0,3159	0,3350	0,3536	0,3720	0,3902	0,4085	0,4269	0,4456	0,4649
	1,45	0,2928	0,3130	0,3323	0,3512	0,3697	0,3881	0,4064	0,4249	0,4437	0,4631
	1,50	0,2895	0,3102	0,3298	0,3488	0,3675	0,3860	0,4045	0,4231	0,4419	0,4613
0,25	1,00	0,3388	0,3561	0,3733	0,3905	0,4076	0,4247	0,4420	0,4596	0,4778	0,4871
	1,05	0,3328	0,3506	0,3681	0,3855	0,4029	0,4203	0,4378	0,4555	0,4738	0,4855
	1,10	0,3269	0,3452	0,3631	0,3808	0,3985	0,4161	0,4337	0,4517	0,4701	0,4840
	1,15	0,3211	0,3400	0,3583	0,3764	0,3942	0,4121	0,4299	0,4480	0,4666	0,4825
	1,20	0,3153	0,3349	0,3537	0,3721	0,3902	0,4083	0,4263	0,4446	0,4633	0,4812
	1,25	0,3095	0,3298	0,3491	0,3679	0,3864	0,4047	0,4229	0,4413	0,4602	0,4800
	1,30	0,3035	0,3248	0,3447	0,3639	0,3827	0,4012	0,4197	0,4383	0,4572	0,4771
	1,35	0,2973	0,3198	0,3404	0,3600	0,3791	0,3979	0,4166	0,4353	0,4544	0,4743
	1,40	0,2905	0,3148	0,3362	0,3563	0,3757	0,3947	0,4136	0,4325	0,4517	0,4717
	1,45	0,2828	0,3096	0,3320	0,3526	0,3724	0,3917	0,4108	0,4299	0,4492	0,4692
	1,50	0,2726	0,3043	0,3278	0,3490	0,3692	0,3888	0,4081	0,4273	0,4468	0,4669
0,3	1,00	0,3533	0,3704	0,3873	0,4042	0,4210	0,4379	0,4550	0,4724	0,4846	0,4927
	1,05	0,3461	0,3637	0,3811	0,3983	0,4155	0,4327	0,4500	0,4676	0,4826	0,4907
	1,10	0,3387	0,3570	0,3749	0,3926	0,4101	0,4276	0,4452	0,4631	0,4807	0,4888
	1,15	0,3312	0,3504	0,3689	0,3870	0,4049	0,4227	0,4406	0,4587	0,4774	0,4871
	1,20	0,3233	0,3436	0,3629	0,3816	0,3999	0,4181	0,4362	0,4545	0,4734	0,4854
	1,25	0,3147	0,3367	0,3569	0,3762	0,3950	0,4135	0,4320	0,4505	0,4696	0,4839
	1,30	0,3046	0,3294	0,3509	0,3709	0,3902	0,4091	0,4279	0,4467	0,4659	0,4825
	1,35	0,2900	0,3215	0,3447	0,3656	0,3855	0,4048	0,4239	0,4430	0,4624	0,4811
	1,40		0,3123	0,3382	0,3603	0,3808	0,4007	0,4201	0,4394	0,4591	0,4797
	1,45		0,2996	0,3313	0,3549	0,3762	0,3966	0,4164	0,4360	0,4558	0,4765
	1,50			0,3236	0,3493	0,3717	0,3926	0,4128	0,4327	0,4527	0,4735

μ_{lu} pour S 500 C ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 6

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1195	0,1277	0,1362	0,1449	0,1538	0,1629	0,1722	0,1818	0,1915	0,2015
0,05	1,00	0,1371	0,1471	0,1571	0,1674	0,1778	0,1883	0,1990	0,2100	0,2211	0,2324
	1,05	0,1340	0,1440	0,1541	0,1644	0,1748	0,1853	0,1960	0,2069	0,2180	0,2293
	1,10	0,1312	0,1412	0,1513	0,1616	0,1720	0,1825	0,1933	0,2042	0,2152	0,2265
	1,15	0,1285	0,1386	0,1487	0,1590	0,1694	0,1800	0,1907	0,2016	0,2127	0,2239
	1,20	0,1259	0,1361	0,1463	0,1566	0,1670	0,1776	0,1883	0,1992	0,2103	0,2216
	1,25	0,1235	0,1338	0,1440	0,1544	0,1648	0,1754	0,1861	0,1970	0,2081	0,2193
	1,30	0,1213	0,1316	0,1419	0,1522	0,1627	0,1733	0,1841	0,1950	0,2060	0,2173
	1,35	0,1191	0,1295	0,1398	0,1503	0,1608	0,1714	0,1821	0,1930	0,2041	0,2154
	1,40	0,1170	0,1275	0,1379	0,1484	0,1589	0,1696	0,1803	0,1912	0,2023	0,2136
	1,45	0,1150	0,1256	0,1361	0,1466	0,1572	0,1678	0,1786	0,1895	0,2006	0,2119
	1,50	0,1131	0,1238	0,1344	0,1449	0,1555	0,1662	0,1770	0,1880	0,1990	0,0000
0,1	1,00	0,1681	0,1792	0,1903	0,2016	0,2130	0,2245	0,2363	0,2482	0,2602	0,2725
	1,05	0,1615	0,1727	0,1839	0,1952	0,2067	0,2183	0,2300	0,2419	0,2540	0,2663
	1,10	0,1550	0,1664	0,1778	0,1892	0,2008	0,2124	0,2242	0,2361	0,2482	0,2605
	1,15	0,1486	0,1603	0,1719	0,1835	0,1951	0,2068	0,2187	0,2306	0,2427	0,2550
	1,20	0,1420	0,1542	0,1661	0,1779	0,1897	0,2015	0,2134	0,2254	0,2376	0,2499
	1,25	0,1351	0,1480	0,1604	0,1724	0,1844	0,1964	0,2084	0,2205	0,2327	0,2451
	1,30	0,1274	0,1417	0,1546	0,1671	0,1793	0,1915	0,2036	0,2158	0,2281	0,2405
	1,35	0,1170	0,1347	0,1488	0,1618	0,1744	0,1867	0,1990	0,2113	0,2237	0,2361
	1,40	0,0866	0,1265	0,1426	0,1564	0,1694	0,1821	0,1946	0,2070	0,2195	0,2320
	1,45		0,0849	0,1358	0,1509	0,1645	0,1775	0,1903	0,2029	0,2154	0,2281
	1,50			0,1273	0,1451	0,1596	0,1730	0,1861	0,1988	0,2115	0,2243
0,15	1,00	0,2075	0,2191	0,2308	0,2427	0,2547	0,2669	0,2793	0,2919	0,3046	0,3176
	1,05	0,1987	0,2103	0,2220	0,2339	0,2460	0,2582	0,2706	0,2831	0,2959	0,3088
	1,10	0,1900	0,2017	0,2136	0,2255	0,2376	0,2499	0,2623	0,2748	0,2876	0,3005
	1,15	0,1812	0,1932	0,2053	0,2174	0,2296	0,2419	0,2543	0,2669	0,2797	0,2926
	1,20	0,1723	0,1847	0,1970	0,2093	0,2217	0,2341	0,2467	0,2593	0,2721	0,2851
	1,25	0,1626	0,1758	0,1887	0,2013	0,2139	0,2265	0,2392	0,2520	0,2649	0,2779
	1,30	0,1514	0,1663	0,1800	0,1932	0,2062	0,2191	0,2320	0,2449	0,2579	0,2710
	1,35	0,1378	0,1550	0,1707	0,1848	0,1984	0,2117	0,2248	0,2380	0,2511	0,2644
	1,40	0,1336	0,1382	0,1595	0,1758	0,1903	0,2042	0,2177	0,2311	0,2445	0,2579
	1,45	0,1288	0,1338	0,1385	0,1651	0,1816	0,1965	0,2106	0,2244	0,2380	0,2516
	1,50	0,1214	0,1284	0,1339	0,1468	0,1717	0,1883	0,2033	0,2176	0,2316	0,2454
0,2	1,00	0,2481	0,2602	0,2725	0,2850	0,2976	0,3104	0,3233	0,3365	0,3498	0,3634
	1,05	0,2381	0,2501	0,2624	0,2748	0,2873	0,3000	0,3129	0,3260	0,3393	0,3528
	1,10	0,2283	0,2403	0,2525	0,2649	0,2774	0,2901	0,3030	0,3160	0,3293	0,3427
	1,15	0,2185	0,2307	0,2429	0,2553	0,2678	0,2805	0,2934	0,3064	0,3197	0,3331
	1,20	0,2088	0,2210	0,2334	0,2459	0,2585	0,2712	0,2841	0,2972	0,3104	0,3239
	1,25	0,1987	0,2113	0,2239	0,2365	0,2493	0,2621	0,2751	0,2882	0,3015	0,3150
	1,30	0,1879	0,2011	0,2142	0,2271	0,2401	0,2531	0,2662	0,2795	0,2928	0,3064
	1,35	0,1787	0,1901	0,2040	0,2175	0,2308	0,2441	0,2575	0,2708	0,2843	0,2980
	1,40	0,1746	0,1792	0,1927	0,2072	0,2212	0,2350	0,2486	0,2623	0,2760	0,2898
	1,45	0,1705	0,1751	0,1797	0,1957	0,2110	0,2255	0,2397	0,2537	0,2677	0,2817
	1,50	0,1661	0,1708	0,1755	0,1809	0,1994	0,2154	0,2304	0,2450	0,2594	0,2736
0,25	1,00	0,2868	0,2995	0,3124	0,3254	0,3386	0,3519	0,3655	0,3792	0,3931	0,4072
	1,05	0,2761	0,2887	0,3014	0,3144	0,3274	0,3407	0,3541	0,3677	0,3815	0,3955
	1,10	0,2656	0,2782	0,2908	0,3037	0,3166	0,3298	0,3431	0,3566	0,3704	0,3843
	1,15	0,2554	0,2679	0,2805	0,2933	0,3062	0,3193	0,3325	0,3460	0,3597	0,3735
	1,20	0,2453	0,2577	0,2703	0,2831	0,2960	0,3091	0,3223	0,3357	0,3493	0,3632
	1,25	0,2351	0,2476	0,2603	0,2730	0,2860	0,2991	0,3123	0,3257	0,3393	0,3532
	1,30	0,2247	0,2374	0,2502	0,2630	0,2761	0,2892	0,3025	0,3159	0,3296	0,3434
	1,35	0,2169	0,2268	0,2399	0,2530	0,2661	0,2794	0,2928	0,3063	0,3200	0,3339
	1,40	0,2127	0,2176	0,2291	0,2426	0,2561	0,2695	0,2831	0,2968	0,3106	0,3246
	1,45	0,2086	0,2134	0,2183	0,2317	0,2456	0,2595	0,2734	0,2873	0,3013	0,3154
	1,50	0,2044	0,2092	0,2141	0,2196	0,2345	0,2490	0,2634	0,2776	0,2919	0,3062
0,3	1,00	0,3222	0,3356	0,3490	0,3627	0,3764	0,3903	0,4043	0,4185	0,4330	0,4477
	1,05	0,3112	0,3244	0,3378	0,3512	0,3648	0,3786	0,3925	0,4066	0,4209	0,4354
	1,10	0,3005	0,3136	0,3268	0,3401	0,3536	0,3672	0,3810	0,3950	0,4092	0,4236
	1,15	0,2901	0,3030	0,3161	0,3293	0,3427	0,3562	0,3699	0,3838	0,3979	0,4122
	1,20	0,2798	0,2926	0,3056	0,3188	0,3320	0,3455	0,3591	0,3729	0,3869	0,4012
	1,25	0,2696	0,2824	0,2953	0,3084	0,3216	0,3350	0,3486	0,3623	0,3763	0,3905
	1,30	0,2594	0,2721	0,2850	0,2981	0,3113	0,3247	0,3383	0,3520	0,3659	0,3801
	1,35	0,2525	0,2618	0,2748	0,2879	0,3011	0,3145	0,3281	0,3418	0,3557	0,3699
	1,40	0,2481	0,2535	0,2643	0,2775	0,2909	0,3043	0,3180	0,3318	0,3457	0,3599
	1,45	0,2439	0,2491	0,2544	0,2670	0,2805	0,2941	0,3079	0,3217	0,3358	0,3500
	1,50	0,2397	0,2449	0,2501	0,2559	0,2698	0,2837	0,2976	0,3117	0,3259	0,3402

μ_{lu} pour S 500 C ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 9

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1586	0,1689	0,1794	0,1902	0,2012	0,2125	0,2240	0,2357	0,2477	0,2599
0,05	1,00	0,1718	0,1835	0,1954	0,2075	0,2198	0,2322	0,2449	0,2578	0,2709	0,2842
	1,05	0,1693	0,1811	0,1930	0,2051	0,2174	0,2299	0,2425	0,2554	0,2685	0,2818
	1,10	0,1671	0,1789	0,1908	0,2029	0,2152	0,2277	0,2403	0,2532	0,2663	0,2796
	1,15	0,1651	0,1769	0,1888	0,2009	0,2132	0,2257	0,2383	0,2512	0,2643	0,2776
	1,20	0,1631	0,1750	0,1869	0,1991	0,2114	0,2238	0,2365	0,2493	0,2624	0,2757
	1,25	0,1614	0,1732	0,1852	0,1973	0,2096	0,2221	0,2348	0,2476	0,2607	0,2740
	1,30	0,1597	0,1716	0,1836	0,1957	0,2080	0,2205	0,2332	0,2460	0,2591	0,2724
	1,35	0,1581	0,1700	0,1821	0,1942	0,2065	0,2190	0,2317	0,2445	0,2576	0,2709
	1,40	0,1567	0,1686	0,1806	0,1928	0,2051	0,2176	0,2303	0,2431	0,2562	0,2695
	1,45	0,1553	0,1673	0,1793	0,1915	0,2038	0,2163	0,2290	0,2418	0,2549	0,2682
	1,50	0,1540	0,1660	0,1781	0,1903	0,2026	0,2151	0,2278	0,2406	0,2537	0,2670
0,1	1,00	0,1935	0,2065	0,2195	0,2326	0,2459	0,2593	0,2728	0,2866	0,3006	0,3147
	1,05	0,1879	0,2010	0,2141	0,2274	0,2407	0,2541	0,2677	0,2815	0,2955	0,3097
	1,10	0,1825	0,1958	0,2091	0,2224	0,2358	0,2493	0,2630	0,2768	0,2908	0,3050
	1,15	0,1773	0,1909	0,2043	0,2178	0,2313	0,2448	0,2586	0,2724	0,2865	0,3007
	1,20	0,1723	0,1861	0,1997	0,2133	0,2269	0,2406	0,2544	0,2683	0,2824	0,2966
	1,25	0,1672	0,1815	0,1954	0,2091	0,2229	0,2366	0,2505	0,2644	0,2786	0,2928
	1,30	0,1622	0,1769	0,1911	0,2051	0,2190	0,2328	0,2468	0,2608	0,2750	0,2893
	1,35	0,1571	0,1725	0,1870	0,2012	0,2153	0,2292	0,2433	0,2574	0,2716	0,2859
	1,40	0,1518	0,1680	0,1830	0,1975	0,2117	0,2258	0,2399	0,2541	0,2684	0,2828
	1,45	0,1461	0,1636	0,1791	0,1939	0,2083	0,2226	0,2368	0,2510	0,2653	0,2798
	1,50	0,1393	0,1590	0,1752	0,1904	0,2050	0,2194	0,2337	0,2481	0,2625	0,2770
0,15	1,00	0,2237	0,2372	0,2507	0,2644	0,2782	0,2921	0,3063	0,3206	0,3351	0,3498
	1,05	0,2154	0,2291	0,2428	0,2566	0,2705	0,2846	0,2987	0,3131	0,3276	0,3424
	1,10	0,2072	0,2212	0,2352	0,2491	0,2632	0,2773	0,2916	0,3060	0,3207	0,3355
	1,15	0,1989	0,2134	0,2277	0,2419	0,2562	0,2704	0,2848	0,2994	0,3140	0,3289
	1,20	0,1904	0,2056	0,2203	0,2349	0,2493	0,2638	0,2784	0,2930	0,3078	0,3227
	1,25	0,1811	0,1975	0,2129	0,2279	0,2427	0,2574	0,2721	0,2869	0,3018	0,3168
	1,30	0,1701	0,1889	0,2054	0,2210	0,2362	0,2512	0,2661	0,2811	0,2961	0,3112
	1,35	0,1373	0,1791	0,1975	0,2140	0,2298	0,2451	0,2603	0,2754	0,2906	0,3058
	1,40	0,1281	0,1657	0,1889	0,2068	0,2233	0,2391	0,2546	0,2700	0,2853	0,3007
	1,45		0,1260	0,1785	0,1992	0,2167	0,2332	0,2491	0,2647	0,2802	0,2958
	1,50			0,1235	0,1907	0,2100	0,2272	0,2436	0,2596	0,2753	0,2910
0,2	1,00	0,2582	0,2718	0,2856	0,2995	0,3136	0,3279	0,3423	0,3570	0,3718	0,3869
	1,05	0,2483	0,2621	0,2760	0,2900	0,3042	0,3185	0,3330	0,3477	0,3626	0,3777
	1,10	0,2385	0,2526	0,2667	0,2808	0,2951	0,3095	0,3241	0,3389	0,3538	0,3690
	1,15	0,2286	0,2430	0,2574	0,2718	0,2863	0,3008	0,3155	0,3304	0,3454	0,3607
	1,20	0,2183	0,2333	0,2481	0,2629	0,2776	0,2924	0,3072	0,3222	0,3373	0,3527
	1,25	0,2071	0,2232	0,2387	0,2539	0,2690	0,2841	0,2991	0,3143	0,3296	0,3450
	1,30	0,1935	0,2121	0,2288	0,2448	0,2604	0,2758	0,2912	0,3066	0,3220	0,3376
	1,35	0,1783	0,1987	0,2181	0,2353	0,2517	0,2676	0,2834	0,2990	0,3147	0,3305
	1,40	0,1729	0,1789	0,2051	0,2250	0,2426	0,2593	0,2755	0,2916	0,3075	0,3235
	1,45	0,1662	0,1732	0,1796	0,2128	0,2328	0,2507	0,2677	0,2842	0,3005	0,3167
	1,50		0,1653	0,1734	0,1927	0,2217	0,2416	0,2596	0,2767	0,2935	0,3101
0,25	1,00	0,2929	0,3068	0,3207	0,3349	0,3492	0,3637	0,3783	0,3932	0,4084	0,4238
	1,05	0,2823	0,2962	0,3102	0,3244	0,3387	0,3532	0,3679	0,3828	0,3980	0,4134
	1,10	0,2718	0,2858	0,2999	0,3142	0,3286	0,3432	0,3579	0,3728	0,3880	0,4035
	1,15	0,2613	0,2755	0,2898	0,3042	0,3187	0,3333	0,3482	0,3632	0,3784	0,3939
	1,20	0,2505	0,2651	0,2796	0,2942	0,3089	0,3237	0,3387	0,3538	0,3691	0,3847
	1,25	0,2392	0,2543	0,2693	0,2842	0,2992	0,3142	0,3294	0,3446	0,3601	0,3757
	1,30	0,2267	0,2429	0,2586	0,2741	0,2894	0,3048	0,3202	0,3356	0,3512	0,3670
	1,35	0,2166	0,2301	0,2472	0,2635	0,2795	0,2953	0,3110	0,3267	0,3426	0,3585
	1,40	0,2117	0,2174	0,2342	0,2521	0,2691	0,2856	0,3018	0,3179	0,3340	0,3502
	1,45	0,2065	0,2124	0,2182	0,2390	0,2579	0,2754	0,2923	0,3090	0,3255	0,3420
	1,50	0,2007	0,2069	0,2130	0,2205	0,2449	0,2645	0,2825	0,2999	0,3169	0,3338
0,3	1,00	0,3257	0,3399	0,3541	0,3685	0,3830	0,3977	0,4126	0,4277	0,4430	0,4588
	1,05	0,3149	0,3290	0,3432	0,3576	0,3721	0,3868	0,4016	0,4167	0,4321	0,4478
	1,10	0,3042	0,3183	0,3326	0,3469	0,3614	0,3761	0,3910	0,4061	0,4215	0,4372
	1,15	0,2936	0,3077	0,3220	0,3364	0,3510	0,3657	0,3806	0,3958	0,4112	0,4269
	1,20	0,2828	0,2971	0,3115	0,3260	0,3407	0,3555	0,3705	0,3857	0,4011	0,4169
	1,25	0,2718	0,2863	0,3010	0,3157	0,3305	0,3454	0,3605	0,3758	0,3913	0,4071
	1,30	0,2602	0,2752	0,2902	0,3052	0,3202	0,3354	0,3507	0,3661	0,3817	0,3976
	1,35	0,2522	0,2633	0,2789	0,2944	0,3098	0,3253	0,3408	0,3564	0,3723	0,3883
	1,40	0,2474	0,2533	0,2668	0,2831	0,2991	0,3150	0,3309	0,3468	0,3628	0,3791
	1,45	0,2426	0,2484	0,2543	0,2708	0,2878	0,3044	0,3208	0,3371	0,3534	0,3699
	1,50	0,2375	0,2435	0,2494	0,2563	0,2753	0,2931	0,3103	0,3272	0,3439	0,3607

μ_{lu} pour S 500 C ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 12

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1887	0,2004	0,2124	0,2246	0,2370	0,2497	0,2626	0,2758	0,2892	0,3029
0,05	1,00	0,1994	0,2123	0,2254	0,2387	0,2522	0,2659	0,2798	0,2940	0,3083	0,3229
	1,05	0,1974	0,2103	0,2235	0,2368	0,2503	0,2640	0,2779	0,2920	0,3064	0,3210
	1,10	0,1955	0,2085	0,2217	0,2350	0,2485	0,2622	0,2761	0,2902	0,3046	0,3192
	1,15	0,1939	0,2068	0,2200	0,2333	0,2468	0,2605	0,2744	0,2885	0,3029	0,3175
	1,20	0,1923	0,2053	0,2185	0,2318	0,2453	0,2590	0,2729	0,2870	0,3014	0,3160
	1,25	0,1909	0,2039	0,2170	0,2304	0,2439	0,2576	0,2715	0,2856	0,3000	0,3146
	1,30	0,1895	0,2025	0,2157	0,2291	0,2426	0,2563	0,2702	0,2843	0,2987	0,3133
	1,35	0,1883	0,2013	0,2145	0,2278	0,2414	0,2551	0,2690	0,2831	0,2975	0,3121
	1,40	0,1871	0,2001	0,2133	0,2267	0,2402	0,2539	0,2678	0,2820	0,2963	0,3109
	1,45	0,1860	0,1991	0,2123	0,2256	0,2392	0,2529	0,2668	0,2809	0,2953	0,3099
	1,50	0,1850	0,1980	0,2113	0,2246	0,2382	0,2519	0,2658	0,2799	0,2943	0,3089
0,1	1,00	0,2159	0,2300	0,2442	0,2584	0,2728	0,2874	0,3021	0,3170	0,3321	0,3475
	1,05	0,2112	0,2254	0,2397	0,2540	0,2685	0,2831	0,2979	0,3128	0,3280	0,3434
	1,10	0,2068	0,2212	0,2355	0,2500	0,2645	0,2791	0,2939	0,3089	0,3241	0,3395
	1,15	0,2026	0,2171	0,2316	0,2461	0,2607	0,2754	0,2903	0,3053	0,3205	0,3360
	1,20	0,1986	0,2133	0,2279	0,2426	0,2572	0,2720	0,2869	0,3020	0,3172	0,3327
	1,25	0,1947	0,2097	0,2244	0,2392	0,2539	0,2688	0,2837	0,2988	0,3141	0,3296
	1,30	0,1910	0,2062	0,2211	0,2360	0,2508	0,2657	0,2807	0,2959	0,3112	0,3267
	1,35	0,1874	0,2029	0,2180	0,2329	0,2479	0,2629	0,2779	0,2931	0,3085	0,3240
	1,40	0,1839	0,1997	0,2150	0,2301	0,2451	0,2602	0,2753	0,2905	0,3059	0,3215
	1,45	0,1805	0,1966	0,2121	0,2273	0,2425	0,2576	0,2728	0,2881	0,3035	0,3191
	1,50	0,1772	0,1936	0,2093	0,2247	0,2400	0,2552	0,2704	0,2857	0,3012	0,3168
0,15	1,00	0,2394	0,2542	0,2689	0,2837	0,2987	0,3137	0,3289	0,3444	0,3600	0,3759
	1,05	0,2320	0,2470	0,2620	0,2770	0,2920	0,3072	0,3225	0,3380	0,3537	0,3696
	1,10	0,2247	0,2401	0,2553	0,2705	0,2857	0,3010	0,3165	0,3320	0,3478	0,3638
	1,15	0,2175	0,2333	0,2489	0,2643	0,2797	0,2952	0,3107	0,3264	0,3423	0,3583
	1,20	0,2102	0,2266	0,2426	0,2584	0,2740	0,2896	0,3053	0,3211	0,3370	0,3532
	1,25	0,2026	0,2200	0,2365	0,2526	0,2685	0,2843	0,3001	0,3161	0,3321	0,3483
	1,30	0,1945	0,2132	0,2304	0,2469	0,2632	0,2792	0,2952	0,3113	0,3274	0,3437
	1,35	0,1851	0,2061	0,2243	0,2414	0,2580	0,2743	0,2905	0,3067	0,3230	0,3394
	1,40	0,1713	0,1985	0,2181	0,2359	0,2529	0,2695	0,2860	0,3023	0,3187	0,3352
	1,45		0,1897	0,2117	0,2305	0,2480	0,2649	0,2816	0,2981	0,3147	0,3313
	1,50		0,1768	0,2049	0,2249	0,2431	0,2604	0,2774	0,2941	0,3108	0,3275
0,2	1,00	0,2682	0,2830	0,2979	0,3129	0,3281	0,3434	0,3588	0,3744	0,3903	0,4065
	1,05	0,2589	0,2740	0,2891	0,3043	0,3196	0,3350	0,3506	0,3663	0,3823	0,3986
	1,10	0,2496	0,2651	0,2805	0,2960	0,3115	0,3271	0,3428	0,3586	0,3747	0,3911
	1,15	0,2401	0,2562	0,2721	0,2878	0,3036	0,3194	0,3353	0,3513	0,3675	0,3839
	1,20	0,2301	0,2471	0,2636	0,2798	0,2959	0,3119	0,3280	0,3442	0,3605	0,3771
	1,25	0,2190	0,2376	0,2550	0,2718	0,2883	0,3047	0,3210	0,3374	0,3539	0,3706
	1,30	0,2052	0,2272	0,2461	0,2637	0,2808	0,2976	0,3142	0,3308	0,3475	0,3644
	1,35	0,1778	0,2148	0,2365	0,2554	0,2733	0,2905	0,3075	0,3245	0,3414	0,3584
	1,40	0,1687	0,1785	0,2256	0,2467	0,2656	0,2835	0,3010	0,3182	0,3354	0,3526
	1,45		0,1674	0,2103	0,2371	0,2577	0,2765	0,2945	0,3121	0,3296	0,3470
	1,50			0,1656	0,2254	0,2492	0,2693	0,2880	0,3061	0,3239	0,3416
0,25	1,00	0,2990	0,3138	0,3287	0,3437	0,3588	0,3742	0,3897	0,4054	0,4214	0,4378
	1,05	0,2887	0,3037	0,3188	0,3339	0,3492	0,3647	0,3803	0,3961	0,4122	0,4287
	1,10	0,2784	0,2937	0,3090	0,3244	0,3399	0,3555	0,3712	0,3872	0,4034	0,4199
	1,15	0,2679	0,2836	0,2993	0,3150	0,3307	0,3465	0,3624	0,3785	0,3949	0,4115
	1,20	0,2569	0,2733	0,2895	0,3056	0,3216	0,3377	0,3539	0,3702	0,3866	0,4034
	1,25	0,2448	0,2625	0,2795	0,2962	0,3126	0,3290	0,3455	0,3620	0,3787	0,3956
	1,30	0,2302	0,2506	0,2689	0,2865	0,3036	0,3204	0,3372	0,3540	0,3709	0,3880
	1,35	0,2163	0,2360	0,2573	0,2763	0,2943	0,3118	0,3290	0,3461	0,3633	0,3806
	1,40	0,2102	0,2171	0,2432	0,2652	0,2846	0,3029	0,3208	0,3384	0,3559	0,3734
	1,45	0,2025	0,2107	0,2181	0,2519	0,2741	0,2938	0,3124	0,3306	0,3485	0,3664
	1,50		0,2016	0,2112	0,2293	0,2619	0,2840	0,3038	0,3227	0,3412	0,3594
0,3	1,00	0,3292	0,3440	0,3589	0,3739	0,3890	0,4043	0,4198	0,4356	0,4517	0,4683
	1,05	0,3187	0,3335	0,3485	0,3636	0,3788	0,3942	0,4098	0,4256	0,4418	0,4584
	1,10	0,3081	0,3231	0,3382	0,3535	0,3688	0,3844	0,4001	0,4160	0,4322	0,4489
	1,15	0,2973	0,3127	0,3280	0,3434	0,3590	0,3747	0,3905	0,4066	0,4229	0,4397
	1,20	0,2863	0,3020	0,3177	0,3334	0,3492	0,3651	0,3812	0,3974	0,4139	0,4307
	1,25	0,2745	0,2909	0,3072	0,3233	0,3395	0,3557	0,3720	0,3884	0,4050	0,4220
	1,30	0,2613	0,2791	0,2962	0,3130	0,3296	0,3462	0,3628	0,3795	0,3964	0,4135
	1,35	0,2520	0,2656	0,2843	0,3021	0,3195	0,3366	0,3536	0,3707	0,3878	0,4052
	1,40	0,2465	0,2531	0,2707	0,2904	0,3089	0,3267	0,3443	0,3618	0,3793	0,3969
	1,45	0,2407	0,2475	0,2543	0,2767	0,2973	0,3164	0,3348	0,3529	0,3708	0,3888
	1,50	0,2339	0,2413	0,2485	0,2573	0,2840	0,3053	0,3249	0,3438	0,3623	0,3807

μ_{lu} pour S 500 C ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 15

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2126	0,2253	0,2382	0,2514	0,2648	0,2784	0,2923	0,3065	0,3209	0,3356
0,05	1,00	0,2215	0,2353	0,2493	0,2634	0,2777	0,2922	0,3070	0,3219	0,3372	0,3527
	1,05	0,2198	0,2336	0,2476	0,2617	0,2760	0,2906	0,3053	0,3203	0,3355	0,3510
	1,10	0,2183	0,2321	0,2460	0,2602	0,2745	0,2890	0,3038	0,3187	0,3340	0,3495
	1,15	0,2169	0,2307	0,2446	0,2588	0,2731	0,2876	0,3024	0,3174	0,3326	0,3481
	1,20	0,2156	0,2294	0,2433	0,2575	0,2718	0,2864	0,3011	0,3161	0,3313	0,3468
	1,25	0,2143	0,2282	0,2421	0,2563	0,2706	0,2852	0,2999	0,3149	0,3301	0,3456
	1,30	0,2132	0,2270	0,2410	0,2552	0,2695	0,2841	0,2988	0,3138	0,3290	0,3445
	1,35	0,2122	0,2260	0,2400	0,2542	0,2685	0,2830	0,2978	0,3128	0,3280	0,3435
	1,40	0,2112	0,2250	0,2390	0,2532	0,2675	0,2821	0,2968	0,3118	0,3271	0,3426
	1,45	0,2103	0,2241	0,2381	0,2523	0,2667	0,2812	0,2960	0,3109	0,3262	0,3417
	1,50	0,2094	0,2233	0,2373	0,2515	0,2658	0,2804	0,2951	0,3101	0,3253	0,3408
0,1	1,00	0,2348	0,2497	0,2646	0,2796	0,2947	0,3100	0,3254	0,3411	0,3570	0,3732
	1,05	0,2309	0,2458	0,2608	0,2758	0,2910	0,3063	0,3218	0,3375	0,3535	0,3697
	1,10	0,2271	0,2422	0,2572	0,2724	0,2876	0,3030	0,3185	0,3343	0,3502	0,3664
	1,15	0,2236	0,2388	0,2539	0,2692	0,2845	0,2999	0,3155	0,3312	0,3472	0,3634
	1,20	0,2203	0,2356	0,2509	0,2662	0,2815	0,2970	0,3126	0,3284	0,3444	0,3607
	1,25	0,2172	0,2326	0,2480	0,2633	0,2788	0,2943	0,3100	0,3258	0,3418	0,3581
	1,30	0,2142	0,2298	0,2453	0,2607	0,2762	0,2918	0,3075	0,3233	0,3394	0,3557
	1,35	0,2114	0,2271	0,2427	0,2582	0,2738	0,2894	0,3051	0,3210	0,3371	0,3535
	1,40	0,2087	0,2246	0,2403	0,2559	0,2715	0,2872	0,3030	0,3189	0,3350	0,3514
	1,45	0,2061	0,2222	0,2380	0,2537	0,2693	0,2851	0,3009	0,3169	0,3330	0,3494
	1,50	0,2037	0,2199	0,2358	0,2516	0,2673	0,2831	0,2990	0,3150	0,3311	0,3475
0,15	1,00	0,2537	0,2692	0,2847	0,3003	0,3160	0,3317	0,3477	0,3638	0,3801	0,3968
	1,05	0,2472	0,2630	0,2787	0,2944	0,3102	0,3261	0,3421	0,3583	0,3748	0,3915
	1,10	0,2408	0,2569	0,2729	0,2888	0,3048	0,3208	0,3370	0,3532	0,3697	0,3865
	1,15	0,2347	0,2512	0,2674	0,2835	0,2997	0,3158	0,3321	0,3485	0,3650	0,3819
	1,20	0,2285	0,2455	0,2621	0,2785	0,2948	0,3111	0,3275	0,3440	0,3606	0,3775
	1,25	0,2224	0,2400	0,2570	0,2736	0,2902	0,3066	0,3231	0,3397	0,3565	0,3734
	1,30	0,2162	0,2346	0,2520	0,2690	0,2857	0,3024	0,3190	0,3357	0,3526	0,3696
	1,35	0,2098	0,2292	0,2472	0,2645	0,2815	0,2983	0,3151	0,3319	0,3489	0,3660
	1,40	0,2029	0,2237	0,2424	0,2601	0,2774	0,2944	0,3114	0,3283	0,3453	0,3625
	1,45	0,1951	0,2181	0,2377	0,2559	0,2734	0,2907	0,3078	0,3249	0,3420	0,3593
	1,50	0,1845	0,2123	0,2329	0,2517	0,2696	0,2871	0,3044	0,3216	0,3388	0,3562
0,2	1,00	0,2778	0,2935	0,3091	0,3249	0,3407	0,3567	0,3728	0,3892	0,4057	0,4227
	1,05	0,2692	0,2852	0,3012	0,3172	0,3332	0,3493	0,3656	0,3821	0,3987	0,4158
	1,10	0,2606	0,2771	0,2934	0,3097	0,3260	0,3423	0,3587	0,3753	0,3921	0,4092
	1,15	0,2518	0,2690	0,2858	0,3025	0,3190	0,3356	0,3522	0,3689	0,3859	0,4031
	1,20	0,2428	0,2609	0,2783	0,2954	0,3123	0,3291	0,3459	0,3628	0,3799	0,3972
	1,25	0,2329	0,2525	0,2708	0,2884	0,3057	0,3228	0,3399	0,3570	0,3742	0,3917
	1,30	0,2213	0,2436	0,2631	0,2814	0,2992	0,3167	0,3340	0,3514	0,3688	0,3864
	1,35	0,2019	0,2337	0,2552	0,2745	0,2929	0,3107	0,3284	0,3460	0,3636	0,3813
	1,40		0,2212	0,2466	0,2674	0,2865	0,3049	0,3229	0,3408	0,3586	0,3765
	1,45			0,2370	0,2600	0,2801	0,2991	0,3176	0,3357	0,3538	0,3718
	1,50			0,2242	0,2520	0,2737	0,2934	0,3123	0,3308	0,3491	0,3674
0,25	1,00	0,3049	0,3204	0,3360	0,3517	0,3675	0,3834	0,3995	0,4158	0,4325	0,4496
	1,05	0,2951	0,3109	0,3268	0,3427	0,3587	0,3748	0,3911	0,4075	0,4243	0,4415
	1,10	0,2852	0,3015	0,3177	0,3339	0,3501	0,3665	0,3829	0,3996	0,4165	0,4337
	1,15	0,2750	0,2919	0,3086	0,3252	0,3418	0,3584	0,3750	0,3919	0,4090	0,4264
	1,20	0,2641	0,2821	0,2995	0,3166	0,3335	0,3505	0,3674	0,3845	0,4017	0,4193
	1,25	0,2520	0,2717	0,2901	0,3079	0,3254	0,3427	0,3600	0,3773	0,3947	0,4125
	1,30	0,2362	0,2601	0,2803	0,2991	0,3172	0,3350	0,3527	0,3703	0,3880	0,4059
	1,35	0,2158	0,2456	0,2694	0,2898	0,3089	0,3273	0,3454	0,3634	0,3814	0,3995
	1,40	0,2073	0,2168	0,2565	0,2799	0,3003	0,3196	0,3383	0,3567	0,3750	0,3934
	1,45		0,2070	0,2319	0,2685	0,2913	0,3117	0,3311	0,3500	0,3687	0,3873
	1,50			0,2064	0,2530	0,2813	0,3035	0,3239	0,3434	0,3625	0,3815
0,3	1,00	0,3326	0,3479	0,3633	0,3788	0,3944	0,4102	0,4262	0,4424	0,4591	0,4764
	1,05	0,3224	0,3379	0,3535	0,3692	0,3850	0,4009	0,4170	0,4334	0,4502	0,4675
	1,10	0,3120	0,3278	0,3437	0,3596	0,3757	0,3918	0,4081	0,4247	0,4415	0,4589
	1,15	0,3014	0,3177	0,3339	0,3502	0,3665	0,3829	0,3994	0,4162	0,4332	0,4507
	1,20	0,2901	0,3072	0,3240	0,3407	0,3574	0,3741	0,3909	0,4079	0,4251	0,4427
	1,25	0,2778	0,2961	0,3138	0,3311	0,3483	0,3653	0,3825	0,3997	0,4171	0,4349
	1,30	0,2630	0,2839	0,3029	0,3212	0,3390	0,3566	0,3741	0,3917	0,4094	0,4274
	1,35	0,2516	0,2690	0,2910	0,3107	0,3295	0,3477	0,3658	0,3837	0,4018	0,4200
	1,40	0,2453	0,2528	0,2764	0,2992	0,3194	0,3387	0,3574	0,3758	0,3942	0,4128
	1,45	0,2375	0,2462	0,2541	0,2854	0,3085	0,3292	0,3488	0,3679	0,3867	0,4056
	1,50	0,2181	0,2372	0,2470	0,2618	0,2958	0,3190	0,3399	0,3598	0,3792	0,3986

μ_{lu} pour S 500 C ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 18

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2320	0,2454	0,2590	0,2729	0,2869	0,3013	0,3158	0,3307	0,3458	0,3612
0,05	1,00	0,2396	0,2540	0,2685	0,2832	0,2981	0,3132	0,3285	0,3441	0,3599	0,3760
	1,05	0,2382	0,2525	0,2671	0,2818	0,2967	0,3118	0,3271	0,3426	0,3585	0,3746
	1,10	0,2368	0,2512	0,2657	0,2805	0,2954	0,3105	0,3258	0,3413	0,3571	0,3733
	1,15	0,2356	0,2500	0,2645	0,2792	0,2941	0,3092	0,3246	0,3401	0,3559	0,3721
	1,20	0,2345	0,2488	0,2634	0,2781	0,2930	0,3081	0,3235	0,3390	0,3548	0,3710
	1,25	0,2334	0,2478	0,2624	0,2771	0,2920	0,3071	0,3224	0,3380	0,3538	0,3700
	1,30	0,2324	0,2468	0,2614	0,2761	0,2910	0,3062	0,3215	0,3371	0,3529	0,3690
	1,35	0,2315	0,2459	0,2605	0,2752	0,2902	0,3053	0,3206	0,3362	0,3520	0,3681
	1,40	0,2307	0,2451	0,2597	0,2744	0,2893	0,3045	0,3198	0,3354	0,3512	0,3673
	1,45	0,2299	0,2443	0,2589	0,2736	0,2886	0,3037	0,3190	0,3346	0,3504	0,3666
	1,50	0,2291	0,2436	0,2582	0,2729	0,2878	0,3030	0,3183	0,3339	0,3497	0,3659
0,1	1,00	0,2507	0,2660	0,2814	0,2969	0,3125	0,3283	0,3443	0,3604	0,3768	0,3936
	1,05	0,2473	0,2627	0,2781	0,2937	0,3094	0,3252	0,3412	0,3574	0,3738	0,3905
	1,10	0,2441	0,2596	0,2751	0,2907	0,3064	0,3223	0,3383	0,3545	0,3710	0,3878
	1,15	0,2411	0,2567	0,2723	0,2879	0,3037	0,3196	0,3357	0,3519	0,3684	0,3852
	1,20	0,2383	0,2540	0,2696	0,2854	0,3012	0,3171	0,3332	0,3495	0,3660	0,3829
	1,25	0,2357	0,2514	0,2672	0,2830	0,2988	0,3148	0,3310	0,3473	0,3638	0,3807
	1,30	0,2332	0,2490	0,2649	0,2807	0,2966	0,3127	0,3288	0,3452	0,3618	0,3786
	1,35	0,2308	0,2468	0,2627	0,2786	0,2946	0,3107	0,3269	0,3432	0,3598	0,3767
	1,40	0,2286	0,2447	0,2607	0,2766	0,2927	0,3088	0,3250	0,3414	0,3580	0,3749
	1,45	0,2265	0,2427	0,2587	0,2748	0,2908	0,3070	0,3233	0,3397	0,3563	0,3732
	1,50	0,2245	0,2408	0,2569	0,2730	0,2891	0,3053	0,3216	0,3381	0,3547	0,3717
0,15	1,00	0,2663	0,2823	0,2983	0,3144	0,3305	0,3467	0,3631	0,3797	0,3966	0,4137
	1,05	0,2605	0,2768	0,2930	0,3092	0,3255	0,3418	0,3583	0,3750	0,3919	0,4091
	1,10	0,2550	0,2716	0,2880	0,3044	0,3208	0,3372	0,3538	0,3706	0,3876	0,4048
	1,15	0,2497	0,2666	0,2832	0,2998	0,3163	0,3329	0,3496	0,3665	0,3835	0,4009
	1,20	0,2445	0,2618	0,2787	0,2954	0,3121	0,3289	0,3457	0,3626	0,3797	0,3971
	1,25	0,2395	0,2571	0,2743	0,2913	0,3082	0,3250	0,3419	0,3590	0,3762	0,3936
	1,30	0,2345	0,2526	0,2702	0,2874	0,3044	0,3214	0,3384	0,3555	0,3728	0,3904
	1,35	0,2295	0,2482	0,2661	0,2836	0,3008	0,3180	0,3351	0,3523	0,3697	0,3873
	1,40	0,2245	0,2440	0,2622	0,2800	0,2974	0,3147	0,3320	0,3493	0,3667	0,3844
	1,45	0,2195	0,2397	0,2585	0,2765	0,2941	0,3116	0,3290	0,3464	0,3639	0,3816
	1,50	0,2142	0,2355	0,2548	0,2731	0,2910	0,3086	0,3261	0,3436	0,3612	0,3790
0,2	1,00	0,2867	0,3029	0,3191	0,3354	0,3517	0,3681	0,3847	0,4015	0,4185	0,4360
	1,05	0,2788	0,2954	0,3119	0,3285	0,3450	0,3616	0,3783	0,3952	0,4124	0,4299
	1,10	0,2710	0,2881	0,3050	0,3218	0,3386	0,3554	0,3723	0,3893	0,4066	0,4242
	1,15	0,2631	0,2809	0,2982	0,3154	0,3324	0,3494	0,3665	0,3837	0,4011	0,4189
	1,20	0,2551	0,2737	0,2916	0,3091	0,3265	0,3438	0,3610	0,3784	0,3960	0,4138
	1,25	0,2466	0,2664	0,2850	0,3031	0,3208	0,3383	0,3558	0,3734	0,3911	0,4090
	1,30	0,2373	0,2590	0,2785	0,2971	0,3152	0,3330	0,3508	0,3685	0,3864	0,4045
	1,35	0,2260	0,2511	0,2719	0,2912	0,3098	0,3280	0,3460	0,3639	0,3819	0,4001
	1,40		0,2423	0,2651	0,2853	0,3045	0,3230	0,3413	0,3595	0,3777	0,3960
	1,45		0,2317	0,2580	0,2794	0,2992	0,3182	0,3368	0,3552	0,3736	0,3921
	1,50			0,2502	0,2734	0,2940	0,3135	0,3324	0,3511	0,3697	0,3883
0,25	1,00	0,3105	0,3266	0,3427	0,3589	0,3751	0,3915	0,4080	0,4247	0,4418	0,4595
	1,05	0,3013	0,3177	0,3342	0,3506	0,3671	0,3837	0,4004	0,4173	0,4345	0,4523
	1,10	0,2919	0,3089	0,3258	0,3425	0,3593	0,3761	0,3931	0,4102	0,4276	0,4454
	1,15	0,2822	0,3000	0,3174	0,3346	0,3517	0,3689	0,3860	0,4034	0,4209	0,4389
	1,20	0,2719	0,2909	0,3090	0,3268	0,3443	0,3618	0,3792	0,3968	0,4145	0,4326
	1,25	0,2603	0,2812	0,3005	0,3190	0,3370	0,3548	0,3726	0,3904	0,4084	0,4267
	1,30	0,2454	0,2706	0,2916	0,3110	0,3297	0,3480	0,3662	0,3843	0,4025	0,4209
	1,35	0,2150	0,2578	0,2820	0,3029	0,3224	0,3413	0,3599	0,3783	0,3968	0,4154
	1,40	0,1951	0,2162	0,2711	0,2943	0,3150	0,3346	0,3537	0,3725	0,3912	0,4101
	1,45			0,2565	0,2849	0,3073	0,3279	0,3475	0,3668	0,3858	0,4049
	1,50				0,2740	0,2993	0,3210	0,3414	0,3611	0,3806	0,3999
0,3	1,00	0,3359	0,3516	0,3674	0,3833	0,3993	0,4154	0,4318	0,4483	0,4654	0,4814
	1,05	0,3260	0,3421	0,3581	0,3743	0,3905	0,4069	0,4234	0,4402	0,4573	0,4753
	1,10	0,3159	0,3324	0,3489	0,3654	0,3819	0,3985	0,4152	0,4322	0,4496	0,4675
	1,15	0,3055	0,3227	0,3397	0,3565	0,3734	0,3903	0,4073	0,4245	0,4420	0,4601
	1,20	0,2944	0,3125	0,3302	0,3477	0,3650	0,3822	0,3996	0,4170	0,4348	0,4530
	1,25	0,2818	0,3017	0,3205	0,3387	0,3565	0,3742	0,3919	0,4097	0,4277	0,4461
	1,30	0,2656	0,2896	0,3101	0,3294	0,3480	0,3662	0,3844	0,4025	0,4208	0,4393
	1,35	0,2512	0,2741	0,2986	0,3196	0,3392	0,3582	0,3769	0,3954	0,4140	0,4328
	1,40	0,2434	0,2525	0,2843	0,3088	0,3301	0,3500	0,3693	0,3884	0,4073	0,4264
	1,45	0,2261	0,2439	0,2540	0,2961	0,3202	0,3415	0,3617	0,3813	0,4007	0,4202
	1,50			0,2443	0,2763	0,3090	0,3326	0,3539	0,3743	0,3942	0,4141

μ_{lu} pour S 500 C ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 21

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2479	0,2619	0,2760	0,2904	0,3049	0,3198	0,3348	0,3501	0,3658	0,3817
0,05	1,00	0,2547	0,2694	0,2844	0,2995	0,3148	0,3303	0,3460	0,3619	0,3782	0,3947
	1,05	0,2534	0,2681	0,2831	0,2982	0,3135	0,3290	0,3447	0,3607	0,3769	0,3935
	1,10	0,2522	0,2670	0,2819	0,2970	0,3123	0,3278	0,3436	0,3595	0,3758	0,3924
	1,15	0,2511	0,2659	0,2808	0,2960	0,3113	0,3268	0,3425	0,3585	0,3747	0,3913
	1,20	0,2501	0,2649	0,2799	0,2950	0,3103	0,3258	0,3415	0,3575	0,3738	0,3904
	1,25	0,2492	0,2640	0,2789	0,2941	0,3094	0,3249	0,3407	0,3566	0,3729	0,3895
	1,30	0,2483	0,2631	0,2781	0,2932	0,3086	0,3241	0,3398	0,3558	0,3721	0,3886
	1,35	0,2475	0,2623	0,2773	0,2925	0,3078	0,3233	0,3391	0,3550	0,3713	0,3879
	1,40	0,2468	0,2616	0,2766	0,2917	0,3071	0,3226	0,3383	0,3543	0,3706	0,3872
	1,45	0,2461	0,2609	0,2759	0,2911	0,3064	0,3219	0,3377	0,3537	0,3699	0,3865
	1,50	0,2454	0,2603	0,2753	0,2904	0,3058	0,3213	0,3371	0,3530	0,3693	0,3859
0,1	1,00	0,2641	0,2798	0,2955	0,3113	0,3273	0,3434	0,3597	0,3762	0,3929	0,4101
	1,05	0,2611	0,2768	0,2926	0,3085	0,3245	0,3406	0,3570	0,3735	0,3903	0,4074
	1,10	0,2583	0,2741	0,2899	0,3059	0,3219	0,3381	0,3545	0,3710	0,3879	0,4050
	1,15	0,2557	0,2716	0,2875	0,3035	0,3195	0,3358	0,3522	0,3688	0,3856	0,4028
	1,20	0,2533	0,2692	0,2852	0,3012	0,3173	0,3336	0,3500	0,3667	0,3835	0,4007
	1,25	0,2510	0,2670	0,2830	0,2991	0,3153	0,3316	0,3481	0,3647	0,3816	0,3988
	1,30	0,2489	0,2649	0,2810	0,2972	0,3134	0,3297	0,3462	0,3629	0,3798	0,3971
	1,35	0,2468	0,2630	0,2792	0,2953	0,3116	0,3280	0,3445	0,3612	0,3781	0,3954
	1,40	0,2450	0,2612	0,2774	0,2936	0,3099	0,3263	0,3429	0,3596	0,3766	0,3938
	1,45	0,2432	0,2595	0,2757	0,2920	0,3084	0,3248	0,3414	0,3581	0,3751	0,3924
	1,50	0,2415	0,2579	0,2742	0,2905	0,3069	0,3233	0,3399	0,3567	0,3737	0,3910
0,15	1,00	0,2773	0,2936	0,3100	0,3263	0,3428	0,3593	0,3760	0,3929	0,4101	0,4276
	1,05	0,2722	0,2888	0,3053	0,3218	0,3383	0,3550	0,3718	0,3887	0,4060	0,4236
	1,10	0,2673	0,2841	0,3008	0,3175	0,3342	0,3509	0,3678	0,3849	0,4022	0,4198
	1,15	0,2627	0,2798	0,2967	0,3135	0,3303	0,3472	0,3641	0,3813	0,3986	0,4164
	1,20	0,2582	0,2756	0,2927	0,3097	0,3266	0,3436	0,3607	0,3779	0,3953	0,4131
	1,25	0,2539	0,2716	0,2889	0,3061	0,3232	0,3403	0,3574	0,3747	0,3923	0,4101
	1,30	0,2498	0,2678	0,2854	0,3027	0,3199	0,3371	0,3544	0,3718	0,3894	0,4072
	1,35	0,2457	0,2641	0,2819	0,2995	0,3168	0,3342	0,3515	0,3690	0,3866	0,4046
	1,40	0,2417	0,2606	0,2787	0,2964	0,3139	0,3314	0,3488	0,3664	0,3841	0,4020
	1,45	0,2378	0,2571	0,2755	0,2934	0,3111	0,3287	0,3462	0,3639	0,3816	0,3997
	1,50	0,2339	0,2538	0,2725	0,2906	0,3085	0,3262	0,3438	0,3615	0,3794	0,3974
0,2	1,00	0,2947	0,3114	0,3280	0,3445	0,3612	0,3779	0,3948	0,4119	0,4292	0,4471
	1,05	0,2875	0,3046	0,3215	0,3383	0,3551	0,3721	0,3891	0,4063	0,4238	0,4417
	1,10	0,2805	0,2980	0,3152	0,3323	0,3494	0,3665	0,3837	0,4011	0,4187	0,4367
	1,15	0,2735	0,2915	0,3092	0,3266	0,3440	0,3613	0,3786	0,3961	0,4139	0,4320
	1,20	0,2664	0,2852	0,3033	0,3211	0,3387	0,3563	0,3738	0,3915	0,4093	0,4275
	1,25	0,2592	0,2789	0,2976	0,3158	0,3337	0,3515	0,3692	0,3870	0,4050	0,4233
	1,30	0,2516	0,2725	0,2920	0,3106	0,3289	0,3469	0,3648	0,3828	0,4010	0,4194
	1,35	0,2432	0,2661	0,2864	0,3056	0,3242	0,3425	0,3607	0,3788	0,3971	0,4156
	1,40	0,2331	0,2593	0,2808	0,3006	0,3196	0,3382	0,3566	0,3750	0,3934	0,4120
	1,45		0,2520	0,2751	0,2957	0,3152	0,3341	0,3528	0,3713	0,3899	0,4086
	1,50		0,2437	0,2693	0,2908	0,3109	0,3302	0,3491	0,3678	0,3865	0,4054
0,25	1,00	0,3158	0,3323	0,3488	0,3653	0,3818	0,3985	0,4153	0,4324	0,4498	0,4678
	1,05	0,3071	0,3241	0,3409	0,3577	0,3745	0,3914	0,4084	0,4257	0,4432	0,4614
	1,10	0,2983	0,3159	0,3332	0,3503	0,3675	0,3846	0,4019	0,4193	0,4370	0,4552
	1,15	0,2893	0,3076	0,3255	0,3431	0,3606	0,3780	0,3955	0,4132	0,4311	0,4494
	1,20	0,2797	0,2993	0,3179	0,3360	0,3539	0,3717	0,3895	0,4073	0,4254	0,4439
	1,25	0,2692	0,2905	0,3102	0,3290	0,3474	0,3655	0,3836	0,4017	0,4200	0,4386
	1,30	0,2561	0,2811	0,3022	0,3219	0,3409	0,3595	0,3779	0,3963	0,4148	0,4336
	1,35	0,2138	0,2703	0,2939	0,3148	0,3345	0,3536	0,3723	0,3910	0,4097	0,4287
	1,40		0,2554	0,2848	0,3074	0,3280	0,3477	0,3669	0,3859	0,4049	0,4241
	1,45			0,2742	0,2997	0,3215	0,3419	0,3616	0,3810	0,4002	0,4196
	1,50			0,2584	0,2913	0,3149	0,3361	0,3564	0,3761	0,3957	0,4153
0,3	1,00	0,3390	0,3551	0,3712	0,3874	0,4037	0,4200	0,4366	0,4535	0,4708	0,4839
	1,05	0,3295	0,3460	0,3625	0,3790	0,3955	0,4121	0,4289	0,4460	0,4635	0,4808
	1,10	0,3198	0,3369	0,3538	0,3707	0,3875	0,4045	0,4215	0,4388	0,4565	0,4749
	1,15	0,3097	0,3276	0,3451	0,3624	0,3797	0,3969	0,4143	0,4318	0,4497	0,4682
	1,20	0,2989	0,3179	0,3362	0,3542	0,3719	0,3895	0,4072	0,4250	0,4431	0,4618
	1,25	0,2864	0,3075	0,3271	0,3458	0,3641	0,3822	0,4003	0,4184	0,4368	0,4556
	1,30	0,2696	0,2958	0,3174	0,3372	0,3563	0,3750	0,3935	0,4120	0,4306	0,4496
	1,35	0,2506	0,2808	0,3066	0,3282	0,3484	0,3677	0,3867	0,4056	0,4245	0,4438
	1,40	0,2396	0,2521	0,2936	0,3185	0,3401	0,3604	0,3800	0,3994	0,4187	0,4382
	1,45		0,2382	0,2538	0,3073	0,3314	0,3529	0,3733	0,3932	0,4129	0,4327
	1,50			0,2359	0,2924	0,3218	0,3451	0,3665	0,3870	0,4072	0,4273

μ_{lu} pour S 500 C ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 24

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2613	0,2756	0,2902	0,3049	0,3198	0,3350	0,3504	0,3661	0,3821	0,3984
0,05	1,00	0,2673	0,2824	0,2976	0,3130	0,3286	0,3444	0,3604	0,3766	0,3932	0,4101
	1,05	0,2661	0,2812	0,2965	0,3119	0,3275	0,3432	0,3592	0,3755	0,3920	0,4090
	1,10	0,2651	0,2802	0,2954	0,3108	0,3264	0,3422	0,3582	0,3745	0,3910	0,4079
	1,15	0,2641	0,2792	0,2945	0,3099	0,3255	0,3413	0,3573	0,3736	0,3901	0,4070
	1,20	0,2632	0,2783	0,2936	0,3090	0,3246	0,3404	0,3564	0,3727	0,3893	0,4062
	1,25	0,2624	0,2775	0,2928	0,3082	0,3238	0,3396	0,3556	0,3719	0,3885	0,4054
	1,30	0,2616	0,2767	0,2920	0,3074	0,3231	0,3389	0,3549	0,3712	0,3877	0,4047
	1,35	0,2609	0,2760	0,2913	0,3068	0,3224	0,3382	0,3542	0,3705	0,3871	0,4040
	1,40	0,2602	0,2754	0,2907	0,3061	0,3217	0,3376	0,3536	0,3699	0,3864	0,4034
	1,45	0,2596	0,2748	0,2900	0,3055	0,3211	0,3370	0,3530	0,3693	0,3859	0,4028
	1,50	0,2590	0,2742	0,2895	0,3049	0,3206	0,3364	0,3524	0,3687	0,3853	0,4022
0,1	1,00	0,2755	0,2914	0,3074	0,3234	0,3396	0,3559	0,3724	0,3892	0,4062	0,4236
	1,05	0,2728	0,2888	0,3048	0,3209	0,3371	0,3535	0,3700	0,3868	0,4039	0,4213
	1,10	0,2703	0,2864	0,3024	0,3186	0,3348	0,3512	0,3678	0,3846	0,4017	0,4192
	1,15	0,2680	0,2841	0,3002	0,3164	0,3327	0,3492	0,3658	0,3826	0,3997	0,4172
	1,20	0,2659	0,2820	0,2982	0,3144	0,3308	0,3473	0,3639	0,3808	0,3979	0,4154
	1,25	0,2639	0,2801	0,2963	0,3126	0,3290	0,3455	0,3622	0,3791	0,3962	0,4137
	1,30	0,2620	0,2783	0,2946	0,3109	0,3273	0,3438	0,3605	0,3775	0,3946	0,4122
	1,35	0,2603	0,2766	0,2929	0,3093	0,3257	0,3423	0,3590	0,3760	0,3932	0,4107
	1,40	0,2586	0,2750	0,2914	0,3078	0,3243	0,3409	0,3576	0,3746	0,3918	0,4093
	1,45	0,2571	0,2735	0,2899	0,3064	0,3229	0,3395	0,3563	0,3733	0,3905	0,4081
	1,50	0,2556	0,2721	0,2885	0,3050	0,3216	0,3382	0,3550	0,3720	0,3893	0,4069
0,15	1,00	0,2869	0,3034	0,3200	0,3365	0,3532	0,3699	0,3868	0,4039	0,4213	0,4391
	1,05	0,2823	0,2991	0,3158	0,3325	0,3492	0,3661	0,3830	0,4002	0,4177	0,4356
	1,10	0,2780	0,2950	0,3118	0,3287	0,3455	0,3625	0,3795	0,3968	0,4143	0,4322
	1,15	0,2739	0,2911	0,3081	0,3251	0,3421	0,3591	0,3763	0,3936	0,4112	0,4292
	1,20	0,2700	0,2874	0,3046	0,3217	0,3388	0,3560	0,3732	0,3906	0,4083	0,4263
	1,25	0,2663	0,2839	0,3013	0,3186	0,3358	0,3530	0,3704	0,3878	0,4056	0,4236
	1,30	0,2627	0,2806	0,2982	0,3156	0,3329	0,3503	0,3677	0,3852	0,4030	0,4211
	1,35	0,2592	0,2774	0,2952	0,3128	0,3302	0,3477	0,3652	0,3828	0,4006	0,4188
	1,40	0,2559	0,2744	0,2924	0,3101	0,3277	0,3452	0,3628	0,3805	0,3984	0,4166
	1,45	0,2527	0,2715	0,2897	0,3076	0,3253	0,3429	0,3605	0,3783	0,3963	0,4145
	1,50	0,2495	0,2687	0,2871	0,3051	0,3230	0,3407	0,3584	0,3763	0,3943	0,4125
0,2	1,00	0,3020	0,3189	0,3357	0,3525	0,3694	0,3863	0,4034	0,4206	0,4383	0,4564
	1,05	0,2955	0,3127	0,3298	0,3469	0,3639	0,3810	0,3983	0,4157	0,4334	0,4516
	1,10	0,2891	0,3068	0,3242	0,3415	0,3588	0,3761	0,3935	0,4110	0,4288	0,4471
	1,15	0,2828	0,3010	0,3188	0,3364	0,3539	0,3714	0,3889	0,4066	0,4246	0,4429
	1,20	0,2766	0,2954	0,3136	0,3315	0,3492	0,3669	0,3846	0,4025	0,4205	0,4390
	1,25	0,2703	0,2898	0,3085	0,3268	0,3448	0,3627	0,3806	0,3986	0,4167	0,4353
	1,30	0,2639	0,2844	0,3036	0,3222	0,3405	0,3586	0,3767	0,3948	0,4132	0,4318
	1,35	0,2572	0,2789	0,2988	0,3179	0,3364	0,3548	0,3730	0,3913	0,4097	0,4285
	1,40	0,2500	0,2734	0,2940	0,3136	0,3325	0,3511	0,3695	0,3880	0,4065	0,4254
	1,45	0,2417	0,2677	0,2893	0,3094	0,3287	0,3475	0,3662	0,3848	0,4034	0,4224
	1,50	0,2303	0,2617	0,2846	0,3053	0,3250	0,3441	0,3630	0,3817	0,4005	0,4196
0,25	1,00	0,3207	0,3375	0,3543	0,3710	0,3878	0,4046	0,4216	0,4389	0,4565	0,4750
	1,05	0,3126	0,3299	0,3470	0,3640	0,3811	0,3982	0,4154	0,4328	0,4506	0,4691
	1,10	0,3044	0,3223	0,3399	0,3573	0,3746	0,3920	0,4095	0,4271	0,4450	0,4636
	1,15	0,2960	0,3147	0,3329	0,3507	0,3684	0,3861	0,4038	0,4216	0,4397	0,4584
	1,20	0,2873	0,3071	0,3259	0,3443	0,3624	0,3803	0,3983	0,4163	0,4347	0,4534
	1,25	0,2778	0,2992	0,3190	0,3379	0,3565	0,3748	0,3930	0,4113	0,4298	0,4487
	1,30	0,2667	0,2909	0,3119	0,3317	0,3507	0,3694	0,3880	0,4065	0,4252	0,4442
	1,35	0,2499	0,2818	0,3047	0,3254	0,3450	0,3642	0,3830	0,4018	0,4207	0,4400
	1,40		0,2708	0,2970	0,3190	0,3394	0,3590	0,3783	0,3974	0,4165	0,4359
	1,45		0,2520	0,2886	0,3125	0,3338	0,3540	0,3736	0,3930	0,4124	0,4319
	1,50			0,2788	0,3057	0,3282	0,3490	0,3691	0,3888	0,4084	0,4282
0,3	1,00	0,3419	0,3583	0,3747	0,3911	0,4076	0,4241	0,4409	0,4579	0,4755	0,4860
	1,05	0,3328	0,3497	0,3665	0,3832	0,4000	0,4168	0,4338	0,4511	0,4689	0,4832
	1,10	0,3236	0,3410	0,3583	0,3755	0,3926	0,4097	0,4270	0,4445	0,4625	0,4806
	1,15	0,3139	0,3322	0,3501	0,3678	0,3853	0,4028	0,4204	0,4382	0,4563	0,4752
	1,20	0,3035	0,3231	0,3419	0,3602	0,3782	0,3961	0,4140	0,4320	0,4504	0,4694
	1,25	0,2914	0,3134	0,3334	0,3524	0,3711	0,3894	0,4077	0,4260	0,4446	0,4638
	1,30	0,2750	0,3024	0,3244	0,3446	0,3639	0,3828	0,4015	0,4202	0,4391	0,4584
	1,35	0,2498	0,2886	0,3146	0,3364	0,3567	0,3763	0,3955	0,4145	0,4337	0,4532
	1,40		0,2514	0,3031	0,3277	0,3494	0,3697	0,3895	0,4089	0,4284	0,4482
	1,45			0,2863	0,3181	0,3417	0,3631	0,3835	0,4035	0,4233	0,4433
	1,50				0,3064	0,3335	0,3563	0,3776	0,3981	0,4183	0,4386

μ_{lu} pour S 500 C ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 27

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2727	0,2873	0,3021	0,3171	0,3323	0,3478	0,3634	0,3794	0,3957	0,4123
0,05	1,00	0,2780	0,2933	0,3088	0,3244	0,3402	0,3562	0,3724	0,3888	0,4056	0,4228
	1,05	0,2770	0,2923	0,3078	0,3234	0,3392	0,3552	0,3714	0,3879	0,4046	0,4218
	1,10	0,2760	0,2913	0,3068	0,3225	0,3383	0,3543	0,3705	0,3869	0,4037	0,4209
	1,15	0,2751	0,2905	0,3060	0,3216	0,3374	0,3534	0,3696	0,3861	0,4029	0,4201
	1,20	0,2743	0,2897	0,3052	0,3208	0,3366	0,3526	0,3689	0,3853	0,4021	0,4193
	1,25	0,2736	0,2889	0,3044	0,3201	0,3359	0,3519	0,3682	0,3846	0,4014	0,4186
	1,30	0,2729	0,2883	0,3038	0,3194	0,3352	0,3513	0,3675	0,3840	0,4008	0,4180
	1,35	0,2723	0,2876	0,3031	0,3188	0,3346	0,3506	0,3669	0,3834	0,4002	0,4174
	1,40	0,2717	0,2870	0,3025	0,3182	0,3340	0,3501	0,3663	0,3828	0,3996	0,4168
	1,45	0,2711	0,2865	0,3020	0,3177	0,3335	0,3495	0,3658	0,3823	0,3991	0,4163
	1,50	0,2706	0,2860	0,3015	0,3172	0,3330	0,3490	0,3653	0,3818	0,3986	0,4158
0,1	1,00	0,2853	0,3014	0,3175	0,3337	0,3500	0,3665	0,3832	0,4001	0,4173	0,4350
	1,05	0,2829	0,2990	0,3152	0,3314	0,3478	0,3643	0,3810	0,3980	0,4152	0,4329
	1,10	0,2807	0,2968	0,3130	0,3293	0,3458	0,3623	0,3791	0,3960	0,4133	0,4310
	1,15	0,2786	0,2948	0,3111	0,3274	0,3439	0,3605	0,3772	0,3942	0,4115	0,4292
	1,20	0,2767	0,2929	0,3093	0,3256	0,3421	0,3588	0,3756	0,3926	0,4099	0,4276
	1,25	0,2749	0,2912	0,3076	0,3240	0,3405	0,3572	0,3740	0,3910	0,4084	0,4261
	1,30	0,2732	0,2896	0,3060	0,3225	0,3390	0,3557	0,3726	0,3896	0,4070	0,4247
	1,35	0,2717	0,2881	0,3045	0,3210	0,3376	0,3543	0,3712	0,3883	0,4057	0,4234
	1,40	0,2702	0,2867	0,3031	0,3197	0,3363	0,3530	0,3699	0,3870	0,4044	0,4222
	1,45	0,2688	0,2853	0,3019	0,3184	0,3351	0,3518	0,3688	0,3859	0,4033	0,4211
	1,50	0,2675	0,2841	0,3006	0,3172	0,3339	0,3507	0,3676	0,3848	0,4022	0,4200
0,15	1,00	0,2953	0,3119	0,3286	0,3453	0,3621	0,3789	0,3960	0,4132	0,4308	0,4488
	1,05	0,2911	0,3080	0,3248	0,3416	0,3585	0,3755	0,3926	0,4099	0,4275	0,4456
	1,10	0,2873	0,3043	0,3213	0,3382	0,3552	0,3723	0,3894	0,4068	0,4245	0,4427
	1,15	0,2836	0,3008	0,3180	0,3350	0,3521	0,3693	0,3865	0,4040	0,4217	0,4399
	1,20	0,2801	0,2976	0,3148	0,3320	0,3492	0,3665	0,3838	0,4013	0,4191	0,4374
	1,25	0,2769	0,2945	0,3119	0,3292	0,3465	0,3638	0,3813	0,3989	0,4167	0,4350
	1,30	0,2737	0,2916	0,3091	0,3266	0,3440	0,3614	0,3789	0,3965	0,4144	0,4328
	1,35	0,2707	0,2888	0,3065	0,3241	0,3416	0,3591	0,3766	0,3944	0,4123	0,4307
	1,40	0,2678	0,2861	0,3040	0,3217	0,3393	0,3569	0,3745	0,3923	0,4103	0,4287
	1,45	0,2651	0,2836	0,3017	0,3195	0,3372	0,3548	0,3725	0,3904	0,4084	0,4269
	1,50	0,2624	0,2812	0,2994	0,3173	0,3351	0,3529	0,3707	0,3886	0,4067	0,4251
0,2	1,00	0,3085	0,3256	0,3426	0,3595	0,3765	0,3936	0,4107	0,4282	0,4459	0,4643
	1,05	0,3026	0,3200	0,3372	0,3544	0,3716	0,3888	0,4061	0,4237	0,4415	0,4600
	1,10	0,2968	0,3146	0,3321	0,3495	0,3669	0,3843	0,4018	0,4195	0,4375	0,4560
	1,15	0,2911	0,3094	0,3272	0,3449	0,3625	0,3801	0,3977	0,4155	0,4336	0,4522
	1,20	0,2856	0,3043	0,3226	0,3405	0,3583	0,3761	0,3939	0,4118	0,4300	0,4487
	1,25	0,2801	0,2994	0,3181	0,3363	0,3543	0,3723	0,3902	0,4083	0,4266	0,4454
	1,30	0,2746	0,2946	0,3137	0,3323	0,3506	0,3687	0,3868	0,4050	0,4234	0,4423
	1,35	0,2690	0,2899	0,3095	0,3284	0,3469	0,3653	0,3835	0,4019	0,4204	0,4393
	1,40	0,2633	0,2852	0,3054	0,3247	0,3434	0,3620	0,3804	0,3989	0,4175	0,4365
	1,45	0,2572	0,2805	0,3013	0,3210	0,3401	0,3589	0,3775	0,3961	0,4148	0,4339
	1,50	0,2505	0,2758	0,2974	0,3175	0,3369	0,3559	0,3746	0,3934	0,4122	0,4314
0,25	1,00	0,3253	0,3423	0,3592	0,3761	0,3930	0,4100	0,4272	0,4446	0,4624	0,4805
	1,05	0,3177	0,3352	0,3525	0,3697	0,3869	0,4041	0,4215	0,4390	0,4570	0,4758
	1,10	0,3100	0,3282	0,3459	0,3635	0,3810	0,3985	0,4161	0,4338	0,4519	0,4708
	1,15	0,3023	0,3212	0,3395	0,3575	0,3753	0,3931	0,4109	0,4289	0,4471	0,4661
	1,20	0,2944	0,3142	0,3332	0,3516	0,3698	0,3879	0,4059	0,4241	0,4426	0,4616
	1,25	0,2859	0,3071	0,3269	0,3459	0,3645	0,3829	0,4012	0,4196	0,4382	0,4574
	1,30	0,2764	0,2998	0,3206	0,3403	0,3593	0,3781	0,3967	0,4153	0,4341	0,4533
	1,35	0,2644	0,2920	0,3142	0,3347	0,3543	0,3734	0,3923	0,4111	0,4301	0,4495
	1,40		0,2833	0,3077	0,3291	0,3493	0,3688	0,3880	0,4071	0,4263	0,4459
	1,45		0,2725	0,3008	0,3235	0,3444	0,3644	0,3839	0,4033	0,4227	0,4424
	1,50			0,2933	0,3178	0,3395	0,3601	0,3800	0,3996	0,4192	0,4390
0,3	1,00	0,3447	0,3613	0,3779	0,3945	0,4111	0,4278	0,4446	0,4618	0,4796	0,4878
	1,05	0,3360	0,3532	0,3702	0,3871	0,4040	0,4210	0,4381	0,4556	0,4735	0,4852
	1,10	0,3272	0,3450	0,3625	0,3799	0,3971	0,4145	0,4319	0,4495	0,4676	0,4828
	1,15	0,3180	0,3367	0,3549	0,3727	0,3904	0,4081	0,4258	0,4437	0,4620	0,4805
	1,20	0,3080	0,3281	0,3471	0,3656	0,3838	0,4019	0,4199	0,4381	0,4566	0,4760
	1,25	0,2967	0,3190	0,3392	0,3585	0,3773	0,3958	0,4142	0,4327	0,4514	0,4709
	1,30	0,2814	0,3089	0,3310	0,3513	0,3708	0,3898	0,4086	0,4274	0,4464	0,4660
	1,35	0,2486	0,2966	0,3222	0,3439	0,3643	0,3839	0,4031	0,4223	0,4416	0,4613
	1,40		0,2505	0,3121	0,3362	0,3577	0,3780	0,3978	0,4173	0,4368	0,4568
	1,45			0,2993	0,3279	0,3509	0,3721	0,3924	0,4124	0,4323	0,4525
	1,50				0,3184	0,3438	0,3662	0,3872	0,4076	0,4278	0,4483

μ_{lu} pour S 500 C ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 6

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1364	0,1456	0,1550	0,1646	0,1745	0,1846	0,1949	0,2054	0,2162	0,2272
0,05	1,00	0,1519	0,1627	0,1736	0,1847	0,1959	0,2073	0,2190	0,2308	0,2428	0,2550
	1,05	0,1491	0,1599	0,1709	0,1819	0,1932	0,2046	0,2162	0,2280	0,2400	0,2522
	1,10	0,1466	0,1574	0,1683	0,1794	0,1907	0,2021	0,2137	0,2255	0,2375	0,2497
	1,15	0,1442	0,1550	0,1660	0,1771	0,1884	0,1998	0,2114	0,2232	0,2352	0,2474
	1,20	0,1419	0,1528	0,1638	0,1750	0,1862	0,1977	0,2093	0,2211	0,2331	0,2452
	1,25	0,1398	0,1508	0,1618	0,1730	0,1842	0,1957	0,2073	0,2191	0,2311	0,2433
	1,30	0,1379	0,1489	0,1599	0,1711	0,1824	0,1938	0,2055	0,2172	0,2292	0,2414
	1,35	0,1360	0,1470	0,1581	0,1693	0,1807	0,1921	0,2037	0,2155	0,2275	0,2397
	1,40	0,1342	0,1453	0,1565	0,1677	0,1790	0,1905	0,2021	0,2139	0,2259	0,2381
	1,45	0,1326	0,1437	0,1549	0,1661	0,1775	0,1890	0,2006	0,2124	0,2244	0,2366
	1,50	0,1310	0,1422	0,1534	0,1647	0,1761	0,1875	0,1992	0,2110	0,2230	0,2351
0,1	1,00	0,1785	0,1904	0,2025	0,2146	0,2268	0,2393	0,2518	0,2646	0,2775	0,2907
	1,05	0,1723	0,1844	0,1965	0,2087	0,2210	0,2335	0,2461	0,2589	0,2718	0,2850
	1,10	0,1662	0,1785	0,1908	0,2031	0,2155	0,2281	0,2407	0,2535	0,2665	0,2796
	1,15	0,1603	0,1729	0,1854	0,1978	0,2103	0,2229	0,2356	0,2485	0,2615	0,2747
	1,20	0,1543	0,1673	0,1801	0,1927	0,2054	0,2181	0,2309	0,2438	0,2568	0,2700
	1,25	0,1482	0,1618	0,1750	0,1878	0,2007	0,2135	0,2264	0,2393	0,2524	0,2657
	1,30	0,1418	0,1563	0,1699	0,1831	0,1961	0,2091	0,2221	0,2351	0,2483	0,2615
	1,35	0,1347	0,1507	0,1649	0,1785	0,1917	0,2048	0,2179	0,2311	0,2443	0,2577
	1,40	0,1253	0,1446	0,1598	0,1739	0,1875	0,2008	0,2140	0,2273	0,2406	0,2540
	1,45		0,1379	0,1547	0,1694	0,1833	0,1968	0,2102	0,2236	0,2370	0,2505
	1,50		0,1290	0,1492	0,1648	0,1792	0,1930	0,2066	0,2201	0,2336	0,2471
0,15	1,00	0,2140	0,2264	0,2389	0,2516	0,2644	0,2774	0,2906	0,3039	0,3175	0,3313
	1,05	0,2053	0,2178	0,2304	0,2432	0,2561	0,2691	0,2823	0,2957	0,3093	0,3230
	1,10	0,1967	0,2094	0,2222	0,2351	0,2481	0,2612	0,2745	0,2879	0,3015	0,3153
	1,15	0,1880	0,2011	0,2142	0,2273	0,2404	0,2537	0,2670	0,2805	0,2941	0,3080
	1,20	0,1790	0,1927	0,2062	0,2196	0,2329	0,2463	0,2598	0,2734	0,2871	0,3010
	1,25	0,1692	0,1840	0,1981	0,2119	0,2256	0,2392	0,2528	0,2666	0,2804	0,2944
	1,30	0,1572	0,1745	0,1898	0,2042	0,2183	0,2322	0,2461	0,2600	0,2739	0,2880
	1,35	0,1377	0,1632	0,1808	0,1963	0,2110	0,2253	0,2395	0,2536	0,2677	0,2819
	1,40	0,1325	0,1380	0,1702	0,1878	0,2035	0,2184	0,2329	0,2473	0,2616	0,2760
	1,45	0,1239	0,1323	0,1530	0,1782	0,1956	0,2114	0,2264	0,2412	0,2557	0,2703
	1,50		0,1183	0,1321	0,1653	0,1870	0,2041	0,2199	0,2351	0,2500	0,2647
0,2	1,00	0,2521	0,2649	0,2778	0,2909	0,3042	0,3176	0,3312	0,3450	0,3590	0,3733
	1,05	0,2421	0,2549	0,2678	0,2809	0,2942	0,3076	0,3212	0,3350	0,3490	0,3633
	1,10	0,2322	0,2451	0,2581	0,2713	0,2846	0,2980	0,3117	0,3255	0,3395	0,3537
	1,15	0,2223	0,2354	0,2486	0,2619	0,2753	0,2888	0,3025	0,3163	0,3304	0,3446
	1,20	0,2122	0,2257	0,2391	0,2526	0,2661	0,2798	0,2935	0,3075	0,3216	0,3359
	1,25	0,2016	0,2156	0,2295	0,2433	0,2571	0,2709	0,2848	0,2989	0,3131	0,3275
	1,30	0,1897	0,2049	0,2195	0,2338	0,2480	0,2621	0,2763	0,2905	0,3048	0,3193
	1,35	0,1785	0,1927	0,2089	0,2241	0,2388	0,2533	0,2678	0,2823	0,2968	0,3114
	1,40	0,1741	0,1791	0,1965	0,2135	0,2292	0,2444	0,2593	0,2741	0,2888	0,3037
	1,45	0,1693	0,1745	0,1796	0,2011	0,2188	0,2351	0,2506	0,2659	0,2810	0,2961
	1,50	0,1637	0,1694	0,1749	0,1818	0,2068	0,2250	0,2417	0,2576	0,2731	0,2885
0,25	1,00	0,2892	0,3024	0,3158	0,3293	0,3429	0,3568	0,3708	0,3850	0,3995	0,4142
	1,05	0,2785	0,2917	0,3050	0,3184	0,3320	0,3458	0,3598	0,3740	0,3883	0,4030
	1,10	0,2681	0,2812	0,2945	0,3079	0,3215	0,3352	0,3492	0,3633	0,3777	0,3923
	1,15	0,2577	0,2708	0,2841	0,2976	0,3112	0,3250	0,3389	0,3531	0,3674	0,3820
	1,20	0,2472	0,2605	0,2739	0,2875	0,3011	0,3149	0,3289	0,3431	0,3575	0,3721
	1,25	0,2366	0,2501	0,2637	0,2774	0,2912	0,3051	0,3192	0,3334	0,3478	0,3625
	1,30	0,2254	0,2394	0,2533	0,2672	0,2812	0,2953	0,3095	0,3239	0,3384	0,3531
	1,35	0,2168	0,2279	0,2425	0,2569	0,2712	0,2856	0,3000	0,3145	0,3291	0,3440
	1,40	0,2123	0,2175	0,2308	0,2460	0,2609	0,2756	0,2904	0,3051	0,3200	0,3350
	1,45	0,2078	0,2130	0,2183	0,2340	0,2500	0,2654	0,2806	0,2957	0,3109	0,3261
	1,50	0,2032	0,2085	0,2137	0,2198	0,2379	0,2545	0,2705	0,2862	0,3017	0,3172
0,3	1,00	0,3236	0,3373	0,3511	0,3650	0,3791	0,3933	0,4077	0,4223	0,4372	0,4524
	1,05	0,3127	0,3263	0,3400	0,3538	0,3678	0,3819	0,3962	0,4108	0,4255	0,4406
	1,10	0,3020	0,3155	0,3291	0,3429	0,3568	0,3708	0,3851	0,3996	0,4143	0,4293
	1,15	0,2914	0,3049	0,3184	0,3322	0,3460	0,3601	0,3743	0,3887	0,4034	0,4183
	1,20	0,2810	0,2944	0,3079	0,3216	0,3355	0,3495	0,3637	0,3781	0,3928	0,4077
	1,25	0,2704	0,2839	0,2975	0,3112	0,3251	0,3392	0,3534	0,3678	0,3824	0,3973
	1,30	0,2597	0,2733	0,2870	0,3008	0,3148	0,3289	0,3432	0,3577	0,3723	0,3873
	1,35	0,2524	0,2623	0,2763	0,2903	0,3045	0,3187	0,3331	0,3476	0,3624	0,3774
	1,40	0,2479	0,2534	0,2652	0,2796	0,2940	0,3084	0,3230	0,3377	0,3526	0,3676
	1,45	0,2434	0,2489	0,2544	0,2683	0,2831	0,2979	0,3128	0,3277	0,3428	0,3580
	1,50	0,2389	0,2444	0,2498	0,2560	0,2717	0,2871	0,3024	0,3176	0,3329	0,3484

μ_{lu} pour S 500 C ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 9

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1775	0,1887	0,2002	0,2119	0,2238	0,2360	0,2484	0,2611	0,2740	0,2872
0,05	1,00	0,1891	0,2016	0,2143	0,2271	0,2402	0,2535	0,2669	0,2806	0,2946	0,3087
	1,05	0,1869	0,1995	0,2122	0,2250	0,2381	0,2514	0,2648	0,2785	0,2924	0,3066
	1,10	0,1850	0,1975	0,2102	0,2231	0,2362	0,2494	0,2629	0,2766	0,2905	0,3047
	1,15	0,1831	0,1957	0,2084	0,2213	0,2344	0,2477	0,2611	0,2748	0,2887	0,3029
	1,20	0,1815	0,1940	0,2068	0,2197	0,2327	0,2460	0,2595	0,2732	0,2871	0,3012
	1,25	0,1799	0,1925	0,2052	0,2181	0,2312	0,2445	0,2580	0,2716	0,2855	0,2997
	1,30	0,1784	0,1911	0,2038	0,2167	0,2298	0,2431	0,2566	0,2702	0,2841	0,2983
	1,35	0,1771	0,1897	0,2025	0,2154	0,2285	0,2418	0,2552	0,2689	0,2828	0,2970
	1,40	0,1758	0,1885	0,2012	0,2142	0,2273	0,2405	0,2540	0,2677	0,2816	0,2957
	1,45	0,1746	0,1873	0,2001	0,2130	0,2261	0,2394	0,2529	0,2666	0,2805	0,2946
	1,50	0,1735	0,1862	0,1990	0,2119	0,2250	0,2383	0,2518	0,2655	0,2794	0,2935
0,1	1,00	0,2074	0,2211	0,2348	0,2487	0,2627	0,2769	0,2912	0,3057	0,3204	0,3354
	1,05	0,2024	0,2162	0,2301	0,2440	0,2581	0,2723	0,2866	0,3012	0,3159	0,3309
	1,10	0,1976	0,2116	0,2256	0,2396	0,2538	0,2680	0,2824	0,2970	0,3118	0,3268
	1,15	0,1930	0,2072	0,2213	0,2355	0,2497	0,2640	0,2785	0,2931	0,3079	0,3229
	1,20	0,1886	0,2030	0,2173	0,2316	0,2459	0,2603	0,2748	0,2895	0,3043	0,3194
	1,25	0,1844	0,1991	0,2135	0,2279	0,2423	0,2568	0,2714	0,2861	0,3010	0,3160
	1,30	0,1803	0,1952	0,2099	0,2244	0,2390	0,2535	0,2681	0,2829	0,2978	0,3129
	1,35	0,1762	0,1915	0,2064	0,2211	0,2358	0,2504	0,2651	0,2799	0,2948	0,3100
	1,40	0,1722	0,1880	0,2031	0,2180	0,2327	0,2474	0,2622	0,2771	0,2921	0,3072
	1,45	0,1682	0,1845	0,1999	0,2149	0,2298	0,2446	0,2595	0,2744	0,2894	0,3046
	1,50	0,1641	0,1810	0,1968	0,2120	0,2271	0,2420	0,2569	0,2719	0,2869	0,3022
0,15	1,00	0,2333	0,2476	0,2619	0,2763	0,2909	0,3055	0,3204	0,3354	0,3506	0,3661
	1,05	0,2255	0,2400	0,2546	0,2692	0,2838	0,2986	0,3135	0,3286	0,3439	0,3595
	1,10	0,2178	0,2327	0,2475	0,2623	0,2771	0,2920	0,3071	0,3223	0,3376	0,3532
	1,15	0,2102	0,2255	0,2407	0,2557	0,2707	0,2858	0,3010	0,3162	0,3317	0,3473
	1,20	0,2023	0,2184	0,2340	0,2493	0,2646	0,2798	0,2951	0,3105	0,3261	0,3418
	1,25	0,1941	0,2112	0,2274	0,2431	0,2587	0,2741	0,2896	0,3051	0,3208	0,3366
	1,30	0,1849	0,2037	0,2207	0,2370	0,2529	0,2686	0,2843	0,2999	0,3157	0,3316
	1,35	0,1732	0,1957	0,2140	0,2309	0,2473	0,2633	0,2791	0,2950	0,3109	0,3269
	1,40		0,1866	0,2070	0,2249	0,2417	0,2581	0,2742	0,2902	0,3063	0,3224
	1,45		0,1738	0,1995	0,2187	0,2362	0,2530	0,2694	0,2856	0,3018	0,3181
	1,50			0,1908	0,2123	0,2307	0,2480	0,2647	0,2812	0,2976	0,3140
0,2	1,00	0,2642	0,2786	0,2931	0,3078	0,3225	0,3374	0,3525	0,3678	0,3833	0,3992
	1,05	0,2547	0,2693	0,2840	0,2988	0,3137	0,3287	0,3439	0,3593	0,3749	0,3907
	1,10	0,2451	0,2601	0,2751	0,2901	0,3051	0,3203	0,3356	0,3511	0,3668	0,3827
	1,15	0,2354	0,2509	0,2663	0,2815	0,2969	0,3122	0,3277	0,3433	0,3591	0,3751
	1,20	0,2252	0,2415	0,2574	0,2731	0,2888	0,3044	0,3200	0,3358	0,3517	0,3679
	1,25	0,2139	0,2317	0,2484	0,2647	0,2808	0,2967	0,3126	0,3286	0,3447	0,3609
	1,30	0,1997	0,2209	0,2391	0,2562	0,2728	0,2891	0,3054	0,3216	0,3378	0,3543
	1,35	0,1781	0,2076	0,2289	0,2474	0,2648	0,2816	0,2982	0,3147	0,3312	0,3478
	1,40	0,1711	0,1787	0,2169	0,2379	0,2565	0,2741	0,2912	0,3080	0,3248	0,3416
	1,45	0,1468	0,1708	0,1969	0,2272	0,2478	0,2664	0,2842	0,3014	0,3185	0,3356
	1,50			0,1704	0,2130	0,2383	0,2585	0,2771	0,2949	0,3124	0,3297
0,25	1,00	0,2966	0,3110	0,3256	0,3403	0,3551	0,3701	0,3853	0,4008	0,4165	0,4325
	1,05	0,2862	0,3007	0,3154	0,3302	0,3451	0,3602	0,3755	0,3910	0,4068	0,4229
	1,10	0,2757	0,2905	0,3054	0,3204	0,3355	0,3507	0,3661	0,3817	0,3975	0,4137
	1,15	0,2652	0,2803	0,2955	0,3107	0,3260	0,3414	0,3569	0,3726	0,3886	0,4048
	1,20	0,2542	0,2699	0,2855	0,3011	0,3166	0,3322	0,3480	0,3638	0,3799	0,3963
	1,25	0,2424	0,2591	0,2753	0,2914	0,3073	0,3232	0,3392	0,3553	0,3715	0,3880
	1,30	0,2285	0,2472	0,2646	0,2814	0,2979	0,3142	0,3305	0,3469	0,3633	0,3800
	1,35	0,2164	0,2332	0,2530	0,2710	0,2883	0,3052	0,3219	0,3386	0,3553	0,3722
	1,40	0,2109	0,2173	0,2390	0,2596	0,2782	0,2960	0,3133	0,3304	0,3474	0,3645
	1,45	0,2045	0,2115	0,2182	0,2461	0,2673	0,2863	0,3044	0,3221	0,3396	0,3570
	1,50	0,1956	0,2045	0,2121	0,2232	0,2545	0,2760	0,2953	0,3138	0,3318	0,3496
0,3	1,00	0,3279	0,3424	0,3570	0,3718	0,3867	0,4018	0,4170	0,4325	0,4484	0,4647
	1,05	0,3172	0,3317	0,3464	0,3612	0,3762	0,3913	0,4067	0,4222	0,4381	0,4544
	1,10	0,3065	0,3212	0,3360	0,3509	0,3659	0,3812	0,3966	0,4122	0,4281	0,4444
	1,15	0,2958	0,3107	0,3256	0,3407	0,3558	0,3712	0,3867	0,4024	0,4184	0,4348
	1,20	0,2848	0,3000	0,3152	0,3305	0,3459	0,3614	0,3770	0,3929	0,4090	0,4254
	1,25	0,2733	0,2890	0,3046	0,3202	0,3359	0,3516	0,3675	0,3835	0,3998	0,4163
	1,30	0,2608	0,2774	0,2937	0,3098	0,3258	0,3419	0,3580	0,3743	0,3907	0,4074
	1,35	0,2521	0,2646	0,2820	0,2989	0,3155	0,3320	0,3485	0,3651	0,3817	0,3986
	1,40	0,2469	0,2532	0,2689	0,2873	0,3048	0,3220	0,3390	0,3559	0,3729	0,3900
	1,45	0,2415	0,2479	0,2543	0,2740	0,2933	0,3114	0,3291	0,3466	0,3640	0,3814
	1,50	0,2356	0,2423	0,2489	0,2568	0,2801	0,3001	0,3189	0,3371	0,3550	0,3729

μ_{lu} pour S 500 C ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 12

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2082	0,2208	0,2335	0,2465	0,2597	0,2732	0,2869	0,3009	0,3152	0,3297
0,05	1,00	0,2175	0,2311	0,2449	0,2589	0,2731	0,2874	0,3020	0,3169	0,3319	0,3473
	1,05	0,2157	0,2294	0,2432	0,2572	0,2713	0,2857	0,3003	0,3151	0,3302	0,3456
	1,10	0,2141	0,2278	0,2416	0,2556	0,2698	0,2842	0,2988	0,3136	0,3287	0,3440
	1,15	0,2127	0,2263	0,2401	0,2541	0,2683	0,2827	0,2973	0,3121	0,3272	0,3426
	1,20	0,2113	0,2250	0,2388	0,2528	0,2670	0,2814	0,2960	0,3108	0,3259	0,3412
	1,25	0,2100	0,2237	0,2376	0,2516	0,2658	0,2802	0,2948	0,3096	0,3247	0,3400
	1,30	0,2089	0,2226	0,2364	0,2504	0,2646	0,2790	0,2936	0,3085	0,3235	0,3389
	1,35	0,2078	0,2215	0,2353	0,2494	0,2636	0,2780	0,2926	0,3074	0,3225	0,3378
	1,40	0,2068	0,2205	0,2343	0,2484	0,2626	0,2770	0,2916	0,3064	0,3215	0,3369
	1,45	0,2058	0,2195	0,2334	0,2474	0,2617	0,2761	0,2907	0,3055	0,3206	0,3359
	1,50	0,2049	0,2187	0,2325	0,2466	0,2608	0,2752	0,2898	0,3047	0,3197	0,3351
0,1	1,00	0,2313	0,2460	0,2608	0,2757	0,2907	0,3058	0,3212	0,3367	0,3525	0,3685
	1,05	0,2272	0,2420	0,2569	0,2718	0,2869	0,3021	0,3175	0,3330	0,3488	0,3649
	1,10	0,2234	0,2383	0,2532	0,2683	0,2834	0,2986	0,3140	0,3296	0,3455	0,3615
	1,15	0,2197	0,2348	0,2498	0,2649	0,2801	0,2954	0,3109	0,3265	0,3424	0,3585
	1,20	0,2163	0,2315	0,2466	0,2618	0,2771	0,2924	0,3079	0,3236	0,3395	0,3556
	1,25	0,2131	0,2284	0,2437	0,2589	0,2742	0,2896	0,3052	0,3209	0,3368	0,3529
	1,30	0,2100	0,2255	0,2408	0,2562	0,2716	0,2870	0,3026	0,3183	0,3343	0,3505
	1,35	0,2070	0,2227	0,2382	0,2536	0,2690	0,2846	0,3002	0,3160	0,3319	0,3481
	1,40	0,2042	0,2200	0,2356	0,2512	0,2667	0,2823	0,2979	0,3137	0,3297	0,3460
	1,45	0,2015	0,2175	0,2332	0,2489	0,2644	0,2801	0,2958	0,3116	0,3277	0,3439
	1,50	0,1989	0,2151	0,2310	0,2467	0,2623	0,2780	0,2938	0,3097	0,3257	0,3420
0,15	1,00	0,2510	0,2664	0,2818	0,2972	0,3127	0,3284	0,3442	0,3602	0,3764	0,3930
	1,05	0,2443	0,2599	0,2755	0,2911	0,3068	0,3226	0,3385	0,3546	0,3709	0,3875
	1,10	0,2378	0,2538	0,2696	0,2854	0,3012	0,3171	0,3332	0,3493	0,3657	0,3823
	1,15	0,2314	0,2478	0,2639	0,2800	0,2960	0,3120	0,3281	0,3444	0,3609	0,3776
	1,20	0,2251	0,2420	0,2584	0,2747	0,2909	0,3071	0,3234	0,3398	0,3563	0,3731
	1,25	0,2187	0,2362	0,2531	0,2697	0,2861	0,3025	0,3189	0,3354	0,3520	0,3689
	1,30	0,2122	0,2306	0,2480	0,2649	0,2815	0,2981	0,3146	0,3312	0,3480	0,3649
	1,35	0,2053	0,2249	0,2429	0,2602	0,2771	0,2939	0,3106	0,3273	0,3441	0,3611
	1,40	0,1978	0,2191	0,2379	0,2557	0,2729	0,2899	0,3067	0,3236	0,3405	0,3576
	1,45	0,1887	0,2131	0,2329	0,2512	0,2688	0,2860	0,3030	0,3200	0,3370	0,3542
	1,50		0,2067	0,2279	0,2468	0,2648	0,2822	0,2995	0,3166	0,3337	0,3510
0,2	1,00	0,2759	0,2914	0,3070	0,3226	0,3383	0,3542	0,3702	0,3864	0,4029	0,4197
	1,05	0,2672	0,2830	0,2989	0,3147	0,3306	0,3466	0,3628	0,3791	0,3957	0,4126
	1,10	0,2584	0,2748	0,2909	0,3071	0,3232	0,3394	0,3558	0,3722	0,3889	0,4059
	1,15	0,2495	0,2665	0,2832	0,2997	0,3161	0,3325	0,3490	0,3656	0,3825	0,3995
	1,20	0,2402	0,2582	0,2755	0,2924	0,3091	0,3258	0,3426	0,3594	0,3763	0,3935
	1,25	0,2301	0,2496	0,2677	0,2852	0,3024	0,3194	0,3363	0,3534	0,3705	0,3878
	1,30	0,2180	0,2404	0,2598	0,2781	0,2957	0,3131	0,3303	0,3476	0,3649	0,3823
	1,35	0,1771	0,2300	0,2516	0,2708	0,2891	0,3070	0,3245	0,3420	0,3595	0,3771
	1,40		0,2162	0,2426	0,2634	0,2826	0,3009	0,3188	0,3366	0,3543	0,3721
	1,45			0,2322	0,2557	0,2759	0,2949	0,3133	0,3313	0,3493	0,3673
	1,50			0,2168	0,2472	0,2691	0,2889	0,3078	0,3262	0,3445	0,3626
0,25	1,00	0,3038	0,3191	0,3346	0,3501	0,3658	0,3816	0,3976	0,4139	0,4304	0,4474
	1,05	0,2938	0,3095	0,3252	0,3410	0,3569	0,3729	0,3890	0,4054	0,4220	0,4391
	1,10	0,2838	0,2999	0,3160	0,3320	0,3482	0,3644	0,3807	0,3972	0,4140	0,4312
	1,15	0,2735	0,2903	0,3068	0,3232	0,3396	0,3561	0,3727	0,3894	0,4063	0,4236
	1,20	0,2626	0,2803	0,2975	0,3144	0,3313	0,3480	0,3648	0,3818	0,3989	0,4163
	1,25	0,2504	0,2698	0,2880	0,3056	0,3229	0,3401	0,3572	0,3744	0,3917	0,4093
	1,30	0,2348	0,2581	0,2780	0,2966	0,3146	0,3322	0,3497	0,3672	0,3848	0,4025
	1,35	0,2159	0,2434	0,2669	0,2871	0,3060	0,3243	0,3423	0,3602	0,3780	0,3960
	1,40	0,2081	0,2169	0,2536	0,2769	0,2972	0,3164	0,3349	0,3532	0,3714	0,3896
	1,45		0,2081	0,2180	0,2651	0,2879	0,3082	0,3275	0,3463	0,3649	0,3834
	1,50			0,2079	0,2484	0,2775	0,2997	0,3200	0,3395	0,3585	0,3774
0,3	1,00	0,3320	0,3472	0,3625	0,3779	0,3934	0,4091	0,4250	0,4411	0,4577	0,4749
	1,05	0,3216	0,3370	0,3525	0,3681	0,3838	0,3996	0,4157	0,4319	0,4486	0,4658
	1,10	0,3112	0,3269	0,3426	0,3584	0,3743	0,3904	0,4066	0,4230	0,4398	0,4570
	1,15	0,3005	0,3167	0,3328	0,3489	0,3650	0,3813	0,3977	0,4143	0,4313	0,4486
	1,20	0,2893	0,3061	0,3228	0,3393	0,3558	0,3724	0,3890	0,4059	0,4230	0,4404
	1,25	0,2771	0,2950	0,3124	0,3296	0,3465	0,3635	0,3804	0,3975	0,4149	0,4325
	1,30	0,2626	0,2829	0,3016	0,3195	0,3371	0,3546	0,3719	0,3894	0,4069	0,4248
	1,35	0,2517	0,2682	0,2896	0,3089	0,3275	0,3455	0,3634	0,3812	0,3991	0,4172
	1,40	0,2456	0,2529	0,2751	0,2973	0,3173	0,3363	0,3548	0,3731	0,3914	0,4098
	1,45	0,2383	0,2465	0,2542	0,2834	0,3062	0,3266	0,3460	0,3650	0,3837	0,4024
	1,50	0,2263	0,2384	0,2474	0,2602	0,2932	0,3162	0,3369	0,3567	0,3760	0,3952

μ_{lu} pour S 500 C ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 15

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2320	0,2454	0,2590	0,2729	0,2869	0,3013	0,3158	0,3307	0,3458	0,3612
0,05	1,00	0,2396	0,2540	0,2685	0,2832	0,2981	0,3132	0,3285	0,3441	0,3599	0,3760
	1,05	0,2382	0,2525	0,2671	0,2818	0,2967	0,3118	0,3271	0,3426	0,3585	0,3746
	1,10	0,2368	0,2512	0,2657	0,2805	0,2954	0,3105	0,3258	0,3413	0,3571	0,3733
	1,15	0,2356	0,2500	0,2645	0,2792	0,2941	0,3092	0,3246	0,3401	0,3559	0,3721
	1,20	0,2345	0,2488	0,2634	0,2781	0,2930	0,3081	0,3235	0,3390	0,3548	0,3710
	1,25	0,2334	0,2478	0,2624	0,2771	0,2920	0,3071	0,3224	0,3380	0,3538	0,3700
	1,30	0,2324	0,2468	0,2614	0,2761	0,2910	0,3062	0,3215	0,3371	0,3529	0,3690
	1,35	0,2315	0,2459	0,2605	0,2752	0,2902	0,3053	0,3206	0,3362	0,3520	0,3681
	1,40	0,2307	0,2451	0,2597	0,2744	0,2893	0,3045	0,3198	0,3354	0,3512	0,3673
	1,45	0,2299	0,2443	0,2589	0,2736	0,2886	0,3037	0,3190	0,3346	0,3504	0,3666
	1,50	0,2291	0,2436	0,2582	0,2729	0,2878	0,3030	0,3183	0,3339	0,3497	0,3659
0,1	1,00	0,2507	0,2660	0,2814	0,2969	0,3125	0,3283	0,3443	0,3604	0,3768	0,3936
	1,05	0,2473	0,2627	0,2781	0,2937	0,3094	0,3252	0,3412	0,3574	0,3738	0,3905
	1,10	0,2441	0,2596	0,2751	0,2907	0,3064	0,3223	0,3383	0,3545	0,3710	0,3878
	1,15	0,2411	0,2567	0,2723	0,2879	0,3037	0,3196	0,3357	0,3519	0,3684	0,3852
	1,20	0,2383	0,2540	0,2696	0,2854	0,3012	0,3171	0,3332	0,3495	0,3660	0,3829
	1,25	0,2357	0,2514	0,2672	0,2830	0,2988	0,3148	0,3310	0,3473	0,3638	0,3807
	1,30	0,2332	0,2490	0,2649	0,2807	0,2966	0,3127	0,3288	0,3452	0,3618	0,3786
	1,35	0,2308	0,2468	0,2627	0,2786	0,2946	0,3107	0,3269	0,3432	0,3598	0,3767
	1,40	0,2286	0,2447	0,2607	0,2766	0,2927	0,3088	0,3250	0,3414	0,3580	0,3749
	1,45	0,2265	0,2427	0,2587	0,2748	0,2908	0,3070	0,3233	0,3397	0,3563	0,3732
	1,50	0,2245	0,2408	0,2569	0,2730	0,2891	0,3053	0,3216	0,3381	0,3547	0,3717
0,15	1,00	0,2663	0,2823	0,2983	0,3144	0,3305	0,3467	0,3631	0,3797	0,3966	0,4137
	1,05	0,2605	0,2768	0,2930	0,3092	0,3255	0,3418	0,3583	0,3750	0,3919	0,4091
	1,10	0,2550	0,2716	0,2880	0,3044	0,3208	0,3372	0,3538	0,3706	0,3876	0,4048
	1,15	0,2497	0,2666	0,2832	0,2998	0,3163	0,3329	0,3496	0,3665	0,3835	0,4009
	1,20	0,2445	0,2618	0,2787	0,2954	0,3121	0,3289	0,3457	0,3626	0,3797	0,3971
	1,25	0,2395	0,2571	0,2743	0,2913	0,3082	0,3250	0,3419	0,3590	0,3762	0,3936
	1,30	0,2345	0,2526	0,2702	0,2874	0,3044	0,3214	0,3384	0,3555	0,3728	0,3904
	1,35	0,2295	0,2482	0,2661	0,2836	0,3008	0,3180	0,3351	0,3523	0,3697	0,3873
	1,40	0,2245	0,2440	0,2622	0,2800	0,2974	0,3147	0,3320	0,3493	0,3667	0,3844
	1,45	0,2195	0,2397	0,2585	0,2765	0,2941	0,3116	0,3290	0,3464	0,3639	0,3816
	1,50	0,2142	0,2355	0,2548	0,2731	0,2910	0,3086	0,3261	0,3436	0,3612	0,3790
0,2	1,00	0,2867	0,3029	0,3191	0,3354	0,3517	0,3681	0,3847	0,4015	0,4185	0,4360
	1,05	0,2788	0,2954	0,3119	0,3285	0,3450	0,3616	0,3783	0,3952	0,4124	0,4299
	1,10	0,2710	0,2881	0,3050	0,3218	0,3386	0,3554	0,3723	0,3893	0,4066	0,4242
	1,15	0,2631	0,2809	0,2982	0,3154	0,3324	0,3494	0,3665	0,3837	0,4011	0,4189
	1,20	0,2551	0,2737	0,2916	0,3091	0,3265	0,3438	0,3610	0,3784	0,3960	0,4138
	1,25	0,2466	0,2664	0,2850	0,3031	0,3208	0,3383	0,3558	0,3734	0,3911	0,4090
	1,30	0,2373	0,2590	0,2785	0,2971	0,3152	0,3330	0,3508	0,3685	0,3864	0,4045
	1,35	0,2260	0,2511	0,2719	0,2912	0,3098	0,3280	0,3460	0,3639	0,3819	0,4001
	1,40		0,2423	0,2651	0,2853	0,3045	0,3230	0,3413	0,3595	0,3777	0,3960
	1,45		0,2317	0,2580	0,2794	0,2992	0,3182	0,3368	0,3552	0,3736	0,3921
	1,50			0,2502	0,2734	0,2940	0,3135	0,3324	0,3511	0,3697	0,3883
0,25	1,00	0,3105	0,3266	0,3427	0,3589	0,3751	0,3915	0,4080	0,4247	0,4418	0,4595
	1,05	0,3013	0,3177	0,3342	0,3506	0,3671	0,3837	0,4004	0,4173	0,4345	0,4523
	1,10	0,2919	0,3089	0,3258	0,3425	0,3593	0,3761	0,3931	0,4102	0,4276	0,4454
	1,15	0,2822	0,3000	0,3174	0,3346	0,3517	0,3689	0,3860	0,4034	0,4209	0,4389
	1,20	0,2719	0,2909	0,3090	0,3268	0,3443	0,3618	0,3792	0,3968	0,4145	0,4326
	1,25	0,2603	0,2812	0,3005	0,3190	0,3370	0,3548	0,3726	0,3904	0,4084	0,4267
	1,30	0,2454	0,2706	0,2916	0,3110	0,3297	0,3480	0,3662	0,3843	0,4025	0,4209
	1,35	0,2150	0,2578	0,2820	0,3029	0,3224	0,3413	0,3599	0,3783	0,3968	0,4154
	1,40	0,1951	0,2162	0,2711	0,2943	0,3150	0,3346	0,3537	0,3725	0,3912	0,4101
	1,45			0,2565	0,2849	0,3073	0,3279	0,3475	0,3668	0,3858	0,4049
	1,50				0,2740	0,2993	0,3210	0,3414	0,3611	0,3806	0,3999
0,3	1,00	0,3359	0,3516	0,3674	0,3833	0,3993	0,4154	0,4318	0,4483	0,4654	0,4814
	1,05	0,3260	0,3421	0,3581	0,3743	0,3905	0,4069	0,4234	0,4402	0,4573	0,4753
	1,10	0,3159	0,3324	0,3489	0,3654	0,3819	0,3985	0,4152	0,4322	0,4496	0,4675
	1,15	0,3055	0,3227	0,3397	0,3565	0,3734	0,3903	0,4073	0,4245	0,4420	0,4601
	1,20	0,2944	0,3125	0,3302	0,3477	0,3650	0,3822	0,3996	0,4170	0,4348	0,4530
	1,25	0,2818	0,3017	0,3205	0,3387	0,3565	0,3742	0,3919	0,4097	0,4277	0,4461
	1,30	0,2656	0,2896	0,3101	0,3294	0,3480	0,3662	0,3844	0,4025	0,4208	0,4393
	1,35	0,2512	0,2741	0,2986	0,3196	0,3392	0,3582	0,3769	0,3954	0,4140	0,4328
	1,40	0,2434	0,2525	0,2843	0,3088	0,3301	0,3500	0,3693	0,3884	0,4073	0,4264
	1,45	0,2261	0,2439	0,2540	0,2961	0,3202	0,3415	0,3617	0,3813	0,4007	0,4202
	1,50			0,2443	0,2763	0,3090	0,3326	0,3539	0,3743	0,3942	0,4141

μ_{lu} pour S 500 C ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 18

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2508	0,2648	0,2790	0,2935	0,3081	0,3230	0,3382	0,3536	0,3693	0,3853
0,05	1,00	0,2574	0,2722	0,2872	0,3024	0,3177	0,3333	0,3491	0,3651	0,3814	0,3981
	1,05	0,2561	0,2709	0,2860	0,3011	0,3165	0,3321	0,3478	0,3639	0,3802	0,3968
	1,10	0,2549	0,2698	0,2848	0,3000	0,3154	0,3309	0,3467	0,3628	0,3791	0,3957
	1,15	0,2539	0,2687	0,2838	0,2990	0,3143	0,3299	0,3457	0,3617	0,3781	0,3947
	1,20	0,2529	0,2678	0,2828	0,2980	0,3134	0,3290	0,3448	0,3608	0,3771	0,3938
	1,25	0,2520	0,2669	0,2819	0,2971	0,3125	0,3281	0,3439	0,3599	0,3762	0,3929
	1,30	0,2511	0,2660	0,2811	0,2963	0,3117	0,3273	0,3431	0,3591	0,3754	0,3921
	1,35	0,2504	0,2653	0,2803	0,2955	0,3109	0,3265	0,3423	0,3584	0,3747	0,3914
	1,40	0,2496	0,2645	0,2796	0,2948	0,3102	0,3258	0,3416	0,3577	0,3740	0,3907
	1,45	0,2490	0,2639	0,2789	0,2942	0,3096	0,3252	0,3410	0,3570	0,3734	0,3900
	1,50	0,2483	0,2632	0,2783	0,2935	0,3089	0,3246	0,3404	0,3564	0,3728	0,3894
0,1	1,00	0,2665	0,2822	0,2980	0,3139	0,3299	0,3461	0,3624	0,3790	0,3958	0,4130
	1,05	0,2636	0,2794	0,2952	0,3111	0,3272	0,3434	0,3598	0,3764	0,3932	0,4104
	1,10	0,2609	0,2767	0,2926	0,3086	0,3247	0,3409	0,3573	0,3740	0,3908	0,4081
	1,15	0,2583	0,2742	0,2902	0,3062	0,3224	0,3386	0,3551	0,3717	0,3887	0,4059
	1,20	0,2560	0,2719	0,2880	0,3040	0,3202	0,3365	0,3530	0,3697	0,3866	0,4039
	1,25	0,2537	0,2698	0,2859	0,3020	0,3182	0,3346	0,3511	0,3678	0,3848	0,4020
	1,30	0,2517	0,2678	0,2839	0,3001	0,3164	0,3328	0,3493	0,3660	0,3830	0,4003
	1,35	0,2497	0,2659	0,2821	0,2983	0,3146	0,3311	0,3476	0,3644	0,3814	0,3987
	1,40	0,2479	0,2642	0,2804	0,2967	0,3130	0,3295	0,3461	0,3628	0,3799	0,3972
	1,45	0,2461	0,2625	0,2788	0,2951	0,3115	0,3280	0,3446	0,3614	0,3784	0,3958
	1,50	0,2445	0,2609	0,2773	0,2936	0,3100	0,3265	0,3432	0,3600	0,3771	0,3945
0,15	1,00	0,2793	0,2957	0,3121	0,3285	0,3450	0,3616	0,3783	0,3953	0,4125	0,4301
	1,05	0,2743	0,2909	0,3075	0,3240	0,3406	0,3573	0,3742	0,3912	0,4085	0,4262
	1,10	0,2696	0,2864	0,3032	0,3199	0,3366	0,3534	0,3703	0,3874	0,4048	0,4225
	1,15	0,2651	0,2822	0,2991	0,3159	0,3328	0,3497	0,3667	0,3839	0,4013	0,4191
	1,20	0,2607	0,2781	0,2952	0,3123	0,3292	0,3463	0,3634	0,3806	0,3981	0,4159
	1,25	0,2566	0,2742	0,2916	0,3088	0,3259	0,3430	0,3602	0,3776	0,3951	0,4130
	1,30	0,2525	0,2705	0,2881	0,3055	0,3227	0,3400	0,3572	0,3747	0,3923	0,4102
	1,35	0,2486	0,2670	0,2848	0,3023	0,3197	0,3371	0,3545	0,3720	0,3896	0,4076
	1,40	0,2448	0,2635	0,2816	0,2993	0,3169	0,3343	0,3518	0,3694	0,3871	0,4052
	1,45	0,2410	0,2602	0,2786	0,2965	0,3142	0,3317	0,3493	0,3670	0,3848	0,4029
	1,50	0,2373	0,2570	0,2756	0,2938	0,3116	0,3293	0,3470	0,3647	0,3826	0,4007
0,2	1,00	0,2962	0,3129	0,3296	0,3462	0,3629	0,3797	0,3966	0,4137	0,4312	0,4491
	1,05	0,2892	0,3063	0,3232	0,3401	0,3570	0,3740	0,3910	0,4083	0,4258	0,4438
	1,10	0,2823	0,2998	0,3171	0,3343	0,3514	0,3686	0,3858	0,4032	0,4209	0,4389
	1,15	0,2754	0,2935	0,3112	0,3287	0,3461	0,3634	0,3808	0,3984	0,4162	0,4343
	1,20	0,2686	0,2873	0,3055	0,3233	0,3410	0,3585	0,3761	0,3938	0,4117	0,4300
	1,25	0,2615	0,2812	0,2999	0,3181	0,3361	0,3539	0,3716	0,3895	0,4075	0,4259
	1,30	0,2542	0,2750	0,2944	0,3131	0,3313	0,3494	0,3674	0,3854	0,4036	0,4220
	1,35	0,2462	0,2688	0,2890	0,3082	0,3268	0,3451	0,3633	0,3815	0,3998	0,4184
	1,40	0,2369	0,2623	0,2836	0,3034	0,3224	0,3410	0,3594	0,3778	0,3962	0,4149
	1,45	0,2233	0,2554	0,2782	0,2986	0,3181	0,3370	0,3557	0,3742	0,3928	0,4116
	1,50		0,2478	0,2726	0,2940	0,3139	0,3332	0,3521	0,3708	0,3895	0,4084
0,25	1,00	0,3168	0,3334	0,3499	0,3665	0,3831	0,3998	0,4166	0,4337	0,4512	0,4694
	1,05	0,3082	0,3253	0,3422	0,3590	0,3759	0,3928	0,4099	0,4272	0,4448	0,4630
	1,10	0,2996	0,3172	0,3346	0,3518	0,3690	0,3862	0,4035	0,4209	0,4387	0,4570
	1,15	0,2907	0,3091	0,3270	0,3447	0,3622	0,3797	0,3973	0,4150	0,4329	0,4513
	1,20	0,2813	0,3009	0,3196	0,3378	0,3557	0,3735	0,3913	0,4092	0,4274	0,4459
	1,25	0,2709	0,2923	0,3120	0,3309	0,3493	0,3675	0,3856	0,4037	0,4221	0,4408
	1,30	0,2583	0,2831	0,3043	0,3240	0,3430	0,3616	0,3800	0,3984	0,4170	0,4358
	1,35	0,2134	0,2727	0,2962	0,3170	0,3367	0,3558	0,3746	0,3933	0,4121	0,4311
	1,40		0,2588	0,2874	0,3099	0,3304	0,3501	0,3693	0,3884	0,4074	0,4266
	1,45			0,2773	0,3024	0,3241	0,3445	0,3642	0,3835	0,4028	0,4222
	1,50			0,2634	0,2944	0,3177	0,3389	0,3591	0,3788	0,3984	0,4180
0,3	1,00	0,3396	0,3558	0,3719	0,3882	0,4045	0,4209	0,4375	0,4544	0,4718	0,4843
	1,05	0,3302	0,3468	0,3633	0,3798	0,3964	0,4131	0,4300	0,4471	0,4646	0,4813
	1,10	0,3206	0,3377	0,3547	0,3717	0,3886	0,4056	0,4227	0,4400	0,4577	0,4763
	1,15	0,3106	0,3285	0,3461	0,3635	0,3808	0,3982	0,4156	0,4332	0,4511	0,4697
	1,20	0,2998	0,3189	0,3374	0,3554	0,3732	0,3909	0,4086	0,4265	0,4447	0,4634
	1,25	0,2874	0,3087	0,3283	0,3472	0,3656	0,3837	0,4019	0,4200	0,4384	0,4573
	1,30	0,2705	0,2971	0,3188	0,3387	0,3579	0,3766	0,3952	0,4137	0,4324	0,4515
	1,35	0,2505	0,2823	0,3082	0,3299	0,3501	0,3695	0,3886	0,4075	0,4265	0,4458
	1,40	0,2382	0,2519	0,2955	0,3204	0,3420	0,3624	0,3820	0,4014	0,4207	0,4403
	1,45		0,2354	0,2725	0,3096	0,3335	0,3550	0,3755	0,3954	0,4151	0,4349
	1,50			0,2308	0,2954	0,3243	0,3475	0,3688	0,3894	0,4095	0,4297

μ_{lu} pour S 500 C ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 21

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2661	0,2805	0,2952	0,3100	0,3251	0,3404	0,3559	0,3717	0,3878	0,4043
0,05	1,00	0,2718	0,2870	0,3023	0,3178	0,3335	0,3493	0,3654	0,3818	0,3984	0,4154
	1,05	0,2707	0,2859	0,3012	0,3167	0,3324	0,3483	0,3644	0,3807	0,3973	0,4144
	1,10	0,2697	0,2848	0,3002	0,3157	0,3314	0,3473	0,3634	0,3797	0,3964	0,4134
	1,15	0,2687	0,2839	0,2993	0,3148	0,3305	0,3464	0,3625	0,3788	0,3955	0,4125
	1,20	0,2679	0,2831	0,2984	0,3140	0,3297	0,3456	0,3617	0,3780	0,3947	0,4117
	1,25	0,2671	0,2823	0,2977	0,3132	0,3289	0,3448	0,3609	0,3773	0,3939	0,4110
	1,30	0,2663	0,2816	0,2969	0,3125	0,3282	0,3441	0,3602	0,3766	0,3932	0,4103
	1,35	0,2657	0,2809	0,2963	0,3118	0,3275	0,3434	0,3596	0,3759	0,3926	0,4096
	1,40	0,2650	0,2803	0,2956	0,3112	0,3269	0,3428	0,3590	0,3753	0,3920	0,4090
	1,45	0,2644	0,2797	0,2951	0,3106	0,3263	0,3423	0,3584	0,3748	0,3914	0,4085
	1,50	0,2639	0,2791	0,2945	0,3101	0,3258	0,3417	0,3579	0,3742	0,3909	0,4080
0,1	1,00	0,2796	0,2956	0,3116	0,3277	0,3440	0,3604	0,3770	0,3938	0,4109	0,4284
	1,05	0,2770	0,2931	0,3091	0,3253	0,3416	0,3580	0,3747	0,3915	0,4086	0,4262
	1,10	0,2747	0,2907	0,3069	0,3231	0,3394	0,3559	0,3726	0,3894	0,4066	0,4241
	1,15	0,2725	0,2886	0,3048	0,3210	0,3374	0,3539	0,3706	0,3875	0,4047	0,4223
	1,20	0,2704	0,2866	0,3028	0,3191	0,3356	0,3521	0,3688	0,3857	0,4030	0,4205
	1,25	0,2685	0,2848	0,3010	0,3174	0,3338	0,3504	0,3671	0,3841	0,4013	0,4189
	1,30	0,2667	0,2830	0,2994	0,3157	0,3322	0,3488	0,3656	0,3826	0,3998	0,4174
	1,35	0,2650	0,2814	0,2978	0,3142	0,3307	0,3474	0,3642	0,3812	0,3984	0,4161
	1,40	0,2635	0,2799	0,2963	0,3128	0,3293	0,3460	0,3628	0,3798	0,3971	0,4148
	1,45	0,2620	0,2785	0,2949	0,3114	0,3280	0,3447	0,3615	0,3786	0,3959	0,4135
	1,50	0,2606	0,2771	0,2936	0,3102	0,3268	0,3435	0,3603	0,3774	0,3947	0,4124
0,15	1,00	0,2904	0,3070	0,3236	0,3402	0,3569	0,3737	0,3907	0,4078	0,4253	0,4432
	1,05	0,2860	0,3028	0,3195	0,3363	0,3531	0,3700	0,3870	0,4043	0,4218	0,4398
	1,10	0,2819	0,2989	0,3158	0,3327	0,3496	0,3666	0,3837	0,4010	0,4186	0,4366
	1,15	0,2780	0,2952	0,3122	0,3292	0,3463	0,3634	0,3806	0,3980	0,4156	0,4337
	1,20	0,2742	0,2917	0,3089	0,3260	0,3432	0,3604	0,3777	0,3951	0,4129	0,4310
	1,25	0,2707	0,2883	0,3058	0,3230	0,3403	0,3576	0,3749	0,3925	0,4103	0,4284
	1,30	0,2673	0,2852	0,3028	0,3202	0,3376	0,3549	0,3724	0,3900	0,4078	0,4260
	1,35	0,2641	0,2822	0,3000	0,3175	0,3350	0,3525	0,3700	0,3877	0,4055	0,4238
	1,40	0,2609	0,2793	0,2973	0,3150	0,3326	0,3501	0,3677	0,3855	0,4034	0,4217
	1,45	0,2579	0,2766	0,2947	0,3126	0,3303	0,3479	0,3656	0,3834	0,4014	0,4197
	1,50	0,2550	0,2739	0,2923	0,3103	0,3281	0,3458	0,3636	0,3814	0,3995	0,4179
0,2	1,00	0,3047	0,3217	0,3386	0,3554	0,3723	0,3893	0,4064	0,4238	0,4415	0,4597
	1,05	0,2984	0,3157	0,3329	0,3500	0,3671	0,3843	0,4015	0,4190	0,4368	0,4551
	1,10	0,2923	0,3100	0,3275	0,3449	0,3622	0,3795	0,3969	0,4146	0,4325	0,4508
	1,15	0,2863	0,3045	0,3223	0,3400	0,3575	0,3750	0,3926	0,4104	0,4284	0,4468
	1,20	0,2803	0,2991	0,3173	0,3353	0,3530	0,3708	0,3885	0,4064	0,4245	0,4431
	1,25	0,2744	0,2938	0,3125	0,3308	0,3488	0,3667	0,3846	0,4027	0,4209	0,4395
	1,30	0,2684	0,2886	0,3078	0,3264	0,3447	0,3629	0,3809	0,3991	0,4175	0,4362
	1,35	0,2622	0,2835	0,3033	0,3223	0,3408	0,3592	0,3774	0,3957	0,4142	0,4330
	1,40	0,2556	0,2783	0,2988	0,3182	0,3371	0,3557	0,3741	0,3926	0,4111	0,4301
	1,45	0,2484	0,2731	0,2944	0,3143	0,3335	0,3523	0,3709	0,3895	0,4082	0,4272
	1,50	0,2398	0,2677	0,2900	0,3104	0,3300	0,3490	0,3679	0,3866	0,4054	0,4245
0,25	1,00	0,3226	0,3395	0,3563	0,3731	0,3900	0,4069	0,4239	0,4413	0,4590	0,4776
	1,05	0,3147	0,3320	0,3493	0,3664	0,3835	0,4007	0,4179	0,4354	0,4533	0,4719
	1,10	0,3067	0,3247	0,3424	0,3599	0,3773	0,3947	0,4122	0,4299	0,4479	0,4666
	1,15	0,2986	0,3174	0,3356	0,3535	0,3713	0,3890	0,4067	0,4246	0,4428	0,4616
	1,20	0,2902	0,3100	0,3289	0,3473	0,3655	0,3835	0,4015	0,4196	0,4380	0,4569
	1,25	0,2811	0,3025	0,3223	0,3413	0,3598	0,3782	0,3964	0,4148	0,4333	0,4523
	1,30	0,2707	0,2946	0,3155	0,3352	0,3543	0,3730	0,3916	0,4102	0,4289	0,4481
	1,35	0,2563	0,2860	0,3086	0,3292	0,3489	0,3680	0,3869	0,4057	0,4247	0,4440
	1,40		0,2761	0,3015	0,3232	0,3435	0,3631	0,3824	0,4015	0,4206	0,4401
	1,45		0,2622	0,2937	0,3171	0,3382	0,3584	0,3780	0,3973	0,4167	0,4363
	1,50			0,2850	0,3108	0,3329	0,3537	0,3737	0,3933	0,4129	0,4327
0,3	1,00	0,3431	0,3595	0,3760	0,3925	0,4090	0,4256	0,4424	0,4595	0,4773	0,4868
	1,05	0,3341	0,3511	0,3680	0,3848	0,4017	0,4186	0,4356	0,4530	0,4708	0,4840
	1,10	0,3250	0,3427	0,3600	0,3773	0,3945	0,4117	0,4290	0,4466	0,4646	0,4815
	1,15	0,3155	0,3340	0,3521	0,3698	0,3874	0,4050	0,4226	0,4405	0,4587	0,4778
	1,20	0,3053	0,3251	0,3440	0,3624	0,3805	0,3985	0,4164	0,4345	0,4530	0,4722
	1,25	0,2935	0,3156	0,3358	0,3549	0,3736	0,3921	0,4104	0,4288	0,4475	0,4668
	1,30	0,2775	0,3050	0,3271	0,3474	0,3668	0,3857	0,4045	0,4232	0,4421	0,4616
	1,35	0,2494	0,2918	0,3177	0,3395	0,3598	0,3794	0,3987	0,4177	0,4370	0,4566
	1,40		0,2511	0,3068	0,3312	0,3528	0,3732	0,3929	0,4124	0,4319	0,4518
	1,45			0,2918	0,3221	0,3455	0,3668	0,3872	0,4072	0,4270	0,4472
	1,50				0,3114	0,3378	0,3604	0,3816	0,4020	0,4223	0,4426

μ_{lu} pour S 500 C ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 24

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2787	0,2934	0,3084	0,3235	0,3389	0,3544	0,3703	0,3863	0,4027	0,4195
0,05	1,00	0,2837	0,2991	0,3147	0,3304	0,3463	0,3624	0,3787	0,3953	0,4121	0,4294
	1,05	0,2827	0,2982	0,3137	0,3295	0,3454	0,3614	0,3778	0,3943	0,4112	0,4285
	1,10	0,2818	0,2973	0,3129	0,3286	0,3445	0,3606	0,3769	0,3935	0,4103	0,4277
	1,15	0,2810	0,2965	0,3120	0,3278	0,3437	0,3598	0,3761	0,3927	0,4096	0,4269
	1,20	0,2802	0,2957	0,3113	0,3270	0,3430	0,3591	0,3754	0,3920	0,4089	0,4262
	1,25	0,2795	0,2950	0,3106	0,3264	0,3423	0,3584	0,3747	0,3913	0,4082	0,4255
	1,30	0,2789	0,2944	0,3100	0,3257	0,3416	0,3578	0,3741	0,3907	0,4076	0,4249
	1,35	0,2783	0,2938	0,3094	0,3251	0,3411	0,3572	0,3735	0,3901	0,4070	0,4243
	1,40	0,2777	0,2932	0,3088	0,3246	0,3405	0,3566	0,3730	0,3896	0,4065	0,4238
	1,45	0,2772	0,2927	0,3083	0,3241	0,3400	0,3561	0,3725	0,3891	0,4060	0,4233
	1,50	0,2767	0,2922	0,3078	0,3236	0,3395	0,3557	0,3720	0,3886	0,4055	0,4229
0,1	1,00	0,2905	0,3067	0,3228	0,3391	0,3555	0,3721	0,3888	0,4058	0,4231	0,4409
	1,05	0,2883	0,3044	0,3207	0,3370	0,3534	0,3700	0,3868	0,4038	0,4212	0,4389
	1,10	0,2862	0,3024	0,3187	0,3350	0,3515	0,3681	0,3850	0,4020	0,4194	0,4371
	1,15	0,2842	0,3005	0,3168	0,3332	0,3498	0,3664	0,3832	0,4003	0,4177	0,4355
	1,20	0,2824	0,2987	0,3151	0,3316	0,3481	0,3648	0,3817	0,3988	0,4162	0,4340
	1,25	0,2807	0,2971	0,3135	0,3300	0,3466	0,3633	0,3802	0,3973	0,4147	0,4326
	1,30	0,2792	0,2956	0,3120	0,3286	0,3452	0,3619	0,3788	0,3960	0,4134	0,4313
	1,35	0,2777	0,2942	0,3107	0,3272	0,3439	0,3606	0,3776	0,3947	0,4122	0,4301
	1,40	0,2763	0,2928	0,3094	0,3260	0,3426	0,3594	0,3764	0,3936	0,4110	0,4289
	1,45	0,2750	0,2916	0,3082	0,3248	0,3415	0,3583	0,3753	0,3925	0,4100	0,4279
	1,50	0,2738	0,2904	0,3070	0,3237	0,3404	0,3572	0,3742	0,3915	0,4090	0,4269
0,15	1,00	0,2998	0,3165	0,3333	0,3500	0,3668	0,3837	0,4008	0,4181	0,4358	0,4539
	1,05	0,2959	0,3128	0,3297	0,3465	0,3635	0,3805	0,3976	0,4150	0,4327	0,4509
	1,10	0,2923	0,3093	0,3263	0,3433	0,3603	0,3774	0,3947	0,4121	0,4299	0,4481
	1,15	0,2888	0,3061	0,3232	0,3403	0,3574	0,3746	0,3919	0,4095	0,4273	0,4456
	1,20	0,2856	0,3030	0,3203	0,3375	0,3547	0,3720	0,3894	0,4070	0,4248	0,4432
	1,25	0,2825	0,3001	0,3175	0,3349	0,3522	0,3695	0,3870	0,4046	0,4226	0,4409
	1,30	0,2796	0,2974	0,3149	0,3324	0,3498	0,3672	0,3848	0,4025	0,4204	0,4388
	1,35	0,2768	0,2948	0,3125	0,3301	0,3476	0,3651	0,3827	0,4004	0,4185	0,4369
	1,40	0,2741	0,2923	0,3102	0,3278	0,3454	0,3630	0,3807	0,3985	0,4166	0,4351
	1,45	0,2716	0,2900	0,3080	0,3258	0,3434	0,3611	0,3788	0,3967	0,4148	0,4333
	1,50	0,2692	0,2877	0,3059	0,3238	0,3416	0,3593	0,3771	0,3950	0,4132	0,4317
0,2	1,00	0,3121	0,3293	0,3463	0,3633	0,3803	0,3974	0,4147	0,4321	0,4500	0,4685
	1,05	0,3065	0,3239	0,3412	0,3584	0,3757	0,3929	0,4103	0,4279	0,4459	0,4645
	1,10	0,3010	0,3188	0,3364	0,3539	0,3713	0,3887	0,4062	0,4240	0,4420	0,4607
	1,15	0,2957	0,3139	0,3318	0,3495	0,3671	0,3847	0,4024	0,4203	0,4384	0,4571
	1,20	0,2905	0,3092	0,3274	0,3454	0,3632	0,3810	0,3988	0,4168	0,4350	0,4538
	1,25	0,2854	0,3046	0,3232	0,3414	0,3594	0,3774	0,3954	0,4135	0,4318	0,4507
	1,30	0,2803	0,3001	0,3191	0,3376	0,3559	0,3740	0,3922	0,4104	0,4288	0,4478
	1,35	0,2752	0,2958	0,3152	0,3340	0,3525	0,3708	0,3891	0,4074	0,4260	0,4450
	1,40	0,2701	0,2915	0,3114	0,3305	0,3493	0,3678	0,3862	0,4047	0,4233	0,4424
	1,45	0,2648	0,2872	0,3077	0,3272	0,3462	0,3648	0,3834	0,4020	0,4208	0,4399
	1,50	0,2592	0,2830	0,3041	0,3239	0,3432	0,3621	0,3808	0,3995	0,4184	0,4376
0,25	1,00	0,3278	0,3449	0,3620	0,3789	0,3959	0,4129	0,4301	0,4476	0,4655	0,4818
	1,05	0,3205	0,3381	0,3555	0,3728	0,3900	0,4073	0,4247	0,4424	0,4604	0,4795
	1,10	0,3132	0,3314	0,3493	0,3669	0,3844	0,4020	0,4196	0,4374	0,4556	0,4747
	1,15	0,3059	0,3248	0,3432	0,3612	0,3791	0,3969	0,4147	0,4327	0,4511	0,4702
	1,20	0,2984	0,3182	0,3372	0,3557	0,3739	0,3920	0,4101	0,4283	0,4468	0,4660
	1,25	0,2904	0,3115	0,3313	0,3503	0,3689	0,3873	0,4056	0,4240	0,4427	0,4620
	1,30	0,2817	0,3047	0,3254	0,3450	0,3640	0,3827	0,4013	0,4199	0,4388	0,4582
	1,35	0,2714	0,2975	0,3194	0,3397	0,3593	0,3783	0,3972	0,4161	0,4351	0,4546
	1,40	0,2544	0,2898	0,3134	0,3346	0,3546	0,3741	0,3932	0,4123	0,4315	0,4511
	1,45		0,2808	0,3072	0,3294	0,3501	0,3699	0,3894	0,4087	0,4281	0,4479
	1,50		0,2686	0,3005	0,3242	0,3456	0,3659	0,3857	0,4053	0,4249	0,4448
0,3	1,00	0,3463	0,3630	0,3797	0,3963	0,4130	0,4298	0,4467	0,4639	0,4808	0,4888
	1,05	0,3379	0,3551	0,3722	0,3892	0,4062	0,4233	0,4405	0,4580	0,4760	0,4863
	1,10	0,3293	0,3472	0,3648	0,3823	0,3997	0,4170	0,4345	0,4522	0,4704	0,4840
	1,15	0,3203	0,3392	0,3575	0,3755	0,3932	0,4110	0,4287	0,4467	0,4651	0,4819
	1,20	0,3108	0,3310	0,3501	0,3687	0,3869	0,4051	0,4232	0,4414	0,4600	0,4796
	1,25	0,2999	0,3223	0,3426	0,3619	0,3807	0,3993	0,4177	0,4362	0,4551	0,4747
	1,30	0,2855	0,3127	0,3348	0,3551	0,3746	0,3936	0,4124	0,4313	0,4503	0,4701
	1,35	0,2475	0,3013	0,3264	0,3481	0,3684	0,3880	0,4073	0,4264	0,4458	0,4657
	1,40		0,2833	0,3172	0,3409	0,3622	0,3825	0,4022	0,4217	0,4413	0,4614
	1,45			0,3059	0,3332	0,3559	0,3770	0,3973	0,4172	0,4371	0,4573
	1,50				0,3247	0,3494	0,3715	0,3923	0,4127	0,4329	0,4534

μ_{lu} pour S 500 C ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 27

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2893	0,3043	0,3194	0,3348	0,3503	0,3661	0,3821	0,3984	0,4150	0,4320
0,05	1,00	0,2938	0,3094	0,3251	0,3410	0,3570	0,3732	0,3897	0,4064	0,4234	0,4409
	1,05	0,2929	0,3085	0,3242	0,3401	0,3561	0,3724	0,3888	0,4055	0,4226	0,4401
	1,10	0,2921	0,3077	0,3234	0,3393	0,3554	0,3716	0,3880	0,4048	0,4218	0,4393
	1,15	0,2913	0,3069	0,3227	0,3386	0,3546	0,3709	0,3873	0,4041	0,4211	0,4386
	1,20	0,2906	0,3063	0,3220	0,3379	0,3540	0,3702	0,3867	0,4034	0,4205	0,4380
	1,25	0,2900	0,3056	0,3214	0,3373	0,3534	0,3696	0,3861	0,4028	0,4199	0,4374
	1,30	0,2894	0,3051	0,3208	0,3367	0,3528	0,3691	0,3856	0,4023	0,4194	0,4369
	1,35	0,2889	0,3045	0,3203	0,3362	0,3523	0,3686	0,3850	0,4018	0,4189	0,4364
	1,40	0,2884	0,3040	0,3198	0,3357	0,3518	0,3681	0,3846	0,4013	0,4184	0,4359
	1,45	0,2879	0,3036	0,3193	0,3353	0,3514	0,3676	0,3841	0,4009	0,4180	0,4355
	1,50	0,2875	0,3031	0,3189	0,3348	0,3509	0,3672	0,3837	0,4005	0,4175	0,4351
0,1	1,00	0,2998	0,3160	0,3323	0,3487	0,3652	0,3818	0,3987	0,4158	0,4332	0,4512
	1,05	0,2977	0,3140	0,3304	0,3468	0,3633	0,3800	0,3969	0,4140	0,4315	0,4494
	1,10	0,2959	0,3122	0,3286	0,3450	0,3616	0,3783	0,3952	0,4124	0,4299	0,4479
	1,15	0,2941	0,3105	0,3269	0,3434	0,3600	0,3768	0,3937	0,4109	0,4284	0,4464
	1,20	0,2925	0,3089	0,3254	0,3419	0,3586	0,3753	0,3923	0,4095	0,4270	0,4450
	1,25	0,2910	0,3075	0,3240	0,3405	0,3572	0,3740	0,3910	0,4082	0,4258	0,4438
	1,30	0,2896	0,3061	0,3227	0,3393	0,3560	0,3728	0,3898	0,4070	0,4246	0,4426
	1,35	0,2883	0,3049	0,3214	0,3381	0,3548	0,3716	0,3887	0,4059	0,4235	0,4416
	1,40	0,2871	0,3037	0,3203	0,3369	0,3537	0,3706	0,3876	0,4049	0,4225	0,4405
	1,45	0,2860	0,3026	0,3192	0,3359	0,3527	0,3696	0,3866	0,4039	0,4215	0,4396
	1,50	0,2849	0,3015	0,3182	0,3349	0,3517	0,3686	0,3857	0,4030	0,4207	0,4387
0,15	1,00	0,3079	0,3247	0,3415	0,3583	0,3752	0,3922	0,4093	0,4267	0,4445	0,4629
	1,05	0,3044	0,3213	0,3383	0,3552	0,3722	0,3892	0,4065	0,4239	0,4417	0,4602
	1,10	0,3011	0,3182	0,3353	0,3523	0,3694	0,3865	0,4038	0,4214	0,4392	0,4577
	1,15	0,2981	0,3153	0,3325	0,3496	0,3668	0,3840	0,4014	0,4190	0,4369	0,4554
	1,20	0,2952	0,3126	0,3299	0,3471	0,3644	0,3817	0,3991	0,4168	0,4347	0,4532
	1,25	0,2925	0,3101	0,3275	0,3448	0,3621	0,3795	0,3970	0,4147	0,4327	0,4513
	1,30	0,2899	0,3076	0,3252	0,3426	0,3600	0,3775	0,3950	0,4128	0,4308	0,4494
	1,35	0,2875	0,3054	0,3230	0,3405	0,3580	0,3756	0,3932	0,4110	0,4291	0,4477
	1,40	0,2852	0,3032	0,3210	0,3386	0,3562	0,3738	0,3914	0,4093	0,4274	0,4461
	1,45	0,2830	0,3012	0,3190	0,3367	0,3544	0,3721	0,3898	0,4077	0,4259	0,4445
	1,50	0,2809	0,2992	0,3172	0,3350	0,3527	0,3705	0,3883	0,4062	0,4244	0,4431
0,2	1,00	0,3187	0,3359	0,3530	0,3701	0,3872	0,4043	0,4216	0,4392	0,4571	0,4760
	1,05	0,3135	0,3310	0,3484	0,3657	0,3829	0,4003	0,4177	0,4354	0,4534	0,4723
	1,10	0,3086	0,3264	0,3441	0,3616	0,3790	0,3965	0,4141	0,4318	0,4500	0,4689
	1,15	0,3039	0,3221	0,3399	0,3577	0,3753	0,3929	0,4106	0,4285	0,4468	0,4657
	1,20	0,2993	0,3179	0,3360	0,3540	0,3718	0,3896	0,4074	0,4254	0,4438	0,4627
	1,25	0,2948	0,3138	0,3323	0,3505	0,3685	0,3864	0,4044	0,4225	0,4410	0,4600
	1,30	0,2904	0,3099	0,3287	0,3471	0,3653	0,3834	0,4015	0,4198	0,4383	0,4574
	1,35	0,2861	0,3061	0,3253	0,3439	0,3623	0,3806	0,3988	0,4172	0,4358	0,4549
	1,40	0,2818	0,3024	0,3220	0,3409	0,3595	0,3779	0,3963	0,4147	0,4334	0,4526
	1,45	0,2776	0,2988	0,3188	0,3380	0,3567	0,3753	0,3938	0,4124	0,4312	0,4504
	1,50	0,2733	0,2953	0,3157	0,3352	0,3541	0,3729	0,3915	0,4102	0,4291	0,4484
0,25	1,00	0,3325	0,3498	0,3669	0,3840	0,4011	0,4182	0,4354	0,4530	0,4710	0,4842
	1,05	0,3258	0,3435	0,3610	0,3784	0,3957	0,4131	0,4305	0,4483	0,4664	0,4823
	1,10	0,3191	0,3374	0,3553	0,3730	0,3906	0,4082	0,4259	0,4438	0,4621	0,4806
	1,15	0,3125	0,3314	0,3498	0,3679	0,3858	0,4036	0,4215	0,4396	0,4581	0,4775
	1,20	0,3057	0,3255	0,3444	0,3629	0,3811	0,3992	0,4173	0,4356	0,4542	0,4736
	1,25	0,2987	0,3195	0,3391	0,3581	0,3766	0,3950	0,4134	0,4318	0,4506	0,4701
	1,30	0,2913	0,3136	0,3339	0,3534	0,3723	0,3910	0,4095	0,4282	0,4471	0,4667
	1,35	0,2831	0,3074	0,3287	0,3488	0,3681	0,3871	0,4059	0,4247	0,4438	0,4635
	1,40	0,2732	0,3010	0,3236	0,3442	0,3640	0,3833	0,4024	0,4214	0,4407	0,4604
	1,45		0,2942	0,3183	0,3398	0,3601	0,3797	0,3990	0,4183	0,4377	0,4575
	1,50		0,2864	0,3130	0,3354	0,3562	0,3762	0,3958	0,4152	0,4348	0,4548
0,3	1,00	0,3493	0,3662	0,3830	0,3997	0,4165	0,4334	0,4504	0,4677	0,4825	0,4906
	1,05	0,3413	0,3588	0,3760	0,3932	0,4103	0,4274	0,4447	0,4623	0,4802	0,4883
	1,10	0,3333	0,3514	0,3692	0,3868	0,4042	0,4217	0,4392	0,4570	0,4754	0,4862
	1,15	0,3249	0,3440	0,3624	0,3805	0,3984	0,4162	0,4340	0,4520	0,4706	0,4842
	1,20	0,3160	0,3364	0,3556	0,3743	0,3926	0,4108	0,4289	0,4472	0,4660	0,4823
	1,25	0,3060	0,3284	0,3488	0,3681	0,3870	0,4056	0,4240	0,4426	0,4616	0,4806
	1,30	0,2936	0,3198	0,3417	0,3620	0,3814	0,4005	0,4193	0,4382	0,4573	0,4774
	1,35	0,2436	0,3101	0,3344	0,3558	0,3759	0,3955	0,4147	0,4338	0,4532	0,4734
	1,40		0,2972	0,3264	0,3494	0,3705	0,3906	0,4102	0,4297	0,4493	0,4696
	1,45			0,3174	0,3428	0,3649	0,3857	0,4058	0,4256	0,4455	0,4659
	1,50			0,3058	0,3358	0,3593	0,3809	0,4015	0,4217	0,4418	0,4624

μ_{lu} pour S 500 C ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 6

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1516	0,1615	0,1717	0,1822	0,1928	0,2037	0,2148	0,2262	0,2378	0,2497
0,05	1,00	0,1654	0,1769	0,1885	0,2003	0,2122	0,2244	0,2367	0,2493	0,2620	0,2750
	1,05	0,1629	0,1744	0,1860	0,1978	0,2098	0,2219	0,2342	0,2468	0,2595	0,2725
	1,10	0,1606	0,1721	0,1837	0,1955	0,2075	0,2196	0,2320	0,2445	0,2573	0,2702
	1,15	0,1584	0,1700	0,1816	0,1934	0,2054	0,2175	0,2299	0,2424	0,2551	0,2681
	1,20	0,1564	0,1680	0,1796	0,1915	0,2034	0,2156	0,2279	0,2405	0,2532	0,2662
	1,25	0,1545	0,1661	0,1778	0,1896	0,2016	0,2138	0,2261	0,2387	0,2514	0,2644
	1,30	0,1528	0,1644	0,1761	0,1880	0,2000	0,2121	0,2245	0,2370	0,2497	0,2627
	1,35	0,1511	0,1628	0,1745	0,1864	0,1984	0,2106	0,2229	0,2354	0,2482	0,2611
	1,40	0,1496	0,1613	0,1730	0,1849	0,1969	0,2091	0,2214	0,2340	0,2467	0,2597
	1,45	0,1481	0,1598	0,1716	0,1835	0,1955	0,2077	0,2201	0,2326	0,2453	0,2583
	1,50	0,1467	0,1585	0,1703	0,1822	0,1942	0,2064	0,2188	0,2313	0,2441	0,2570
0,1	1,00	0,1886	0,2013	0,2140	0,2268	0,2398	0,2529	0,2661	0,2796	0,2932	0,3071
	1,05	0,1828	0,1956	0,2084	0,2214	0,2344	0,2475	0,2608	0,2743	0,2880	0,3019
	1,10	0,1772	0,1902	0,2032	0,2162	0,2293	0,2425	0,2559	0,2694	0,2831	0,2970
	1,15	0,1718	0,1850	0,1982	0,2114	0,2246	0,2379	0,2513	0,2648	0,2786	0,2925
	1,20	0,1664	0,1800	0,1934	0,2067	0,2201	0,2334	0,2469	0,2605	0,2743	0,2882
	1,25	0,1611	0,1751	0,1888	0,2023	0,2158	0,2292	0,2428	0,2565	0,2703	0,2843
	1,30	0,1557	0,1703	0,1843	0,1981	0,2117	0,2253	0,2389	0,2527	0,2665	0,2805
	1,35	0,1501	0,1655	0,1800	0,1940	0,2078	0,2215	0,2352	0,2490	0,2630	0,2770
	1,40	0,1440	0,1607	0,1757	0,1900	0,2040	0,2179	0,2317	0,2456	0,2596	0,2737
	1,45	0,1369	0,1557	0,1714	0,1861	0,2004	0,2144	0,2284	0,2423	0,2564	0,2705
	1,50	0,1258	0,1504	0,1671	0,1823	0,1969	0,2111	0,2252	0,2392	0,2534	0,2676
0,15	1,00	0,2205	0,2336	0,2469	0,2602	0,2737	0,2874	0,3012	0,3152	0,3294	0,3439
	1,05	0,2120	0,2254	0,2388	0,2522	0,2658	0,2796	0,2934	0,3075	0,3218	0,3362
	1,10	0,2037	0,2173	0,2309	0,2446	0,2583	0,2721	0,2861	0,3002	0,3145	0,3290
	1,15	0,1952	0,2093	0,2232	0,2371	0,2510	0,2650	0,2791	0,2933	0,3077	0,3222
	1,20	0,1864	0,2012	0,2156	0,2298	0,2440	0,2581	0,2724	0,2867	0,3011	0,3158
	1,25	0,1769	0,1929	0,2080	0,2226	0,2371	0,2515	0,2659	0,2804	0,2949	0,3096
	1,30	0,1654	0,1840	0,2001	0,2154	0,2303	0,2450	0,2596	0,2743	0,2890	0,3038
	1,35	0,1375	0,1736	0,1919	0,2081	0,2236	0,2387	0,2536	0,2684	0,2832	0,2982
	1,40	0,1302	0,1573	0,1826	0,2005	0,2168	0,2324	0,2476	0,2627	0,2777	0,2928
	1,45		0,1293	0,1706	0,1923	0,2098	0,2261	0,2418	0,2571	0,2724	0,2876
	1,50			0,1280	0,1827	0,2025	0,2197	0,2359	0,2517	0,2672	0,2826
0,2	1,00	0,2562	0,2695	0,2830	0,2967	0,3105	0,3245	0,3387	0,3531	0,3677	0,3826
	1,05	0,2462	0,2597	0,2733	0,2870	0,3009	0,3150	0,3292	0,3436	0,3582	0,3731
	1,10	0,2364	0,2501	0,2638	0,2777	0,2916	0,3058	0,3201	0,3345	0,3492	0,3641
	1,15	0,2265	0,2404	0,2544	0,2685	0,2826	0,2969	0,3113	0,3258	0,3405	0,3555
	1,20	0,2162	0,2307	0,2451	0,2594	0,2738	0,2882	0,3027	0,3174	0,3322	0,3473
	1,25	0,2051	0,2205	0,2356	0,2503	0,2650	0,2797	0,2944	0,3093	0,3242	0,3393
	1,30	0,1920	0,2095	0,2256	0,2411	0,2562	0,2713	0,2863	0,3013	0,3164	0,3317
	1,35	0,1784	0,1964	0,2148	0,2314	0,2473	0,2628	0,2782	0,2935	0,3089	0,3243
	1,40	0,1734	0,1790	0,2018	0,2209	0,2380	0,2543	0,2701	0,2858	0,3014	0,3171
	1,45	0,1675	0,1737	0,1796	0,2085	0,2280	0,2454	0,2620	0,2781	0,2941	0,3100
	1,50	0,1584	0,1672	0,1740	0,1867	0,2163	0,2359	0,2536	0,2704	0,2868	0,3031
0,25	1,00	0,2917	0,3053	0,3191	0,3330	0,3471	0,3614	0,3759	0,3906	0,4055	0,4207
	1,05	0,2810	0,2947	0,3085	0,3224	0,3365	0,3508	0,3653	0,3800	0,3949	0,4101
	1,10	0,2705	0,2843	0,2981	0,3121	0,3262	0,3406	0,3550	0,3697	0,3847	0,3999
	1,15	0,2601	0,2739	0,2879	0,3020	0,3162	0,3306	0,3451	0,3599	0,3748	0,3900
	1,20	0,2494	0,2635	0,2777	0,2919	0,3063	0,3208	0,3355	0,3503	0,3653	0,3806
	1,25	0,2383	0,2529	0,2674	0,2819	0,2965	0,3112	0,3260	0,3409	0,3561	0,3714
	1,30	0,2262	0,2416	0,2568	0,2717	0,2867	0,3016	0,3166	0,3318	0,3470	0,3625
	1,35	0,2167	0,2293	0,2455	0,2612	0,2767	0,2920	0,3073	0,3227	0,3381	0,3538
	1,40	0,2119	0,2174	0,2329	0,2499	0,2662	0,2822	0,2979	0,3136	0,3294	0,3452
	1,45	0,2070	0,2126	0,2182	0,2372	0,2551	0,2720	0,2884	0,3045	0,3206	0,3367
	1,50	0,2017	0,2075	0,2133	0,2202	0,2423	0,2610	0,2784	0,2953	0,3118	0,3283
0,3	1,00	0,3250	0,3390	0,3531	0,3673	0,3817	0,3963	0,4110	0,4259	0,4412	0,4568
	1,05	0,3142	0,3281	0,3421	0,3563	0,3707	0,3852	0,3999	0,4148	0,4300	0,4455
	1,10	0,3035	0,3174	0,3314	0,3456	0,3599	0,3744	0,3891	0,4040	0,4191	0,4346
	1,15	0,2929	0,3068	0,3208	0,3350	0,3494	0,3639	0,3786	0,3935	0,4086	0,4241
	1,20	0,2822	0,2962	0,3103	0,3246	0,3390	0,3535	0,3683	0,3832	0,3984	0,4139
	1,25	0,2713	0,2855	0,2998	0,3142	0,3287	0,3433	0,3582	0,3732	0,3884	0,4039
	1,30	0,2600	0,2745	0,2891	0,3037	0,3184	0,3332	0,3482	0,3633	0,3786	0,3942
	1,35	0,2523	0,2630	0,2780	0,2930	0,3080	0,3231	0,3382	0,3535	0,3690	0,3847
	1,40	0,2476	0,2533	0,2662	0,2819	0,2973	0,3128	0,3282	0,3438	0,3594	0,3753
	1,45	0,2429	0,2486	0,2544	0,2699	0,2861	0,3021	0,3180	0,3339	0,3499	0,3660
	1,50	0,2380	0,2438	0,2496	0,2562	0,2740	0,2910	0,3075	0,3239	0,3402	0,3566

μ_u pour S 500 C ; $f_{c\,28}$ = 35 MPa ; α_e = 9

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1939	0,2059	0,2180	0,2304	0,2431	0,2560	0,2691	0,2825	0,2962	0,3102
0,05	1,00	0,2042	0,2173	0,2306	0,2441	0,2578	0,2717	0,2858	0,3001	0,3147	0,3295
	1,05	0,2023	0,2154	0,2287	0,2422	0,2559	0,2698	0,2839	0,2982	0,3128	0,3276
	1,10	0,2005	0,2137	0,2270	0,2405	0,2542	0,2681	0,2822	0,2965	0,3110	0,3259
	1,15	0,1989	0,2120	0,2254	0,2389	0,2526	0,2665	0,2806	0,2949	0,3095	0,3243
	1,20	0,1974	0,2106	0,2239	0,2374	0,2511	0,2650	0,2791	0,2934	0,3080	0,3228
	1,25	0,1960	0,2092	0,2225	0,2360	0,2497	0,2636	0,2777	0,2921	0,3066	0,3214
	1,30	0,1947	0,2079	0,2213	0,2348	0,2485	0,2624	0,2765	0,2908	0,3054	0,3202
	1,35	0,1935	0,2067	0,2201	0,2336	0,2473	0,2612	0,2753	0,2896	0,3042	0,3190
	1,40	0,1924	0,2056	0,2190	0,2325	0,2462	0,2601	0,2742	0,2886	0,3031	0,3179
	1,45	0,1913	0,2045	0,2179	0,2315	0,2452	0,2591	0,2732	0,2875	0,3021	0,3169
	1,50	0,1903	0,2036	0,2170	0,2305	0,2442	0,2581	0,2723	0,2866	0,3011	0,3160
0,1	1,00	0,2200	0,2342	0,2486	0,2630	0,2776	0,2923	0,3072	0,3223	0,3376	0,3531
	1,05	0,2154	0,2298	0,2443	0,2588	0,2734	0,2882	0,3031	0,3182	0,3336	0,3491
	1,10	0,2112	0,2257	0,2402	0,2548	0,2695	0,2843	0,2993	0,3145	0,3298	0,3454
	1,15	0,2071	0,2218	0,2365	0,2511	0,2659	0,2808	0,2958	0,3110	0,3264	0,3420
	1,20	0,2033	0,2181	0,2329	0,2477	0,2625	0,2775	0,2925	0,3078	0,3232	0,3388
	1,25	0,1996	0,2146	0,2295	0,2444	0,2593	0,2743	0,2895	0,3047	0,3202	0,3359
	1,30	0,1961	0,2113	0,2264	0,2414	0,2564	0,2714	0,2866	0,3019	0,3174	0,3331
	1,35	0,1927	0,2081	0,2234	0,2385	0,2535	0,2687	0,2839	0,2992	0,3148	0,3305
	1,40	0,1894	0,2051	0,2205	0,2357	0,2509	0,2661	0,2814	0,2968	0,3123	0,3281
	1,45	0,1862	0,2022	0,2178	0,2331	0,2484	0,2636	0,2790	0,2944	0,3100	0,3258
	1,50	0,1831	0,1994	0,2151	0,2306	0,2460	0,2613	0,2767	0,2922	0,3078	0,3236
0,15	1,00	0,2424	0,2573	0,2723	0,2873	0,3024	0,3176	0,3330	0,3486	0,3644	0,3804
	1,05	0,2352	0,2504	0,2655	0,2807	0,2959	0,3113	0,3267	0,3424	0,3583	0,3744
	1,10	0,2281	0,2436	0,2590	0,2744	0,2898	0,3053	0,3209	0,3366	0,3526	0,3687
	1,15	0,2211	0,2371	0,2528	0,2684	0,2840	0,2996	0,3153	0,3312	0,3472	0,3635
	1,20	0,2140	0,2306	0,2468	0,2627	0,2785	0,2943	0,3101	0,3261	0,3422	0,3585
	1,25	0,2068	0,2242	0,2408	0,2571	0,2731	0,2891	0,3051	0,3212	0,3374	0,3538
	1,30	0,1992	0,2177	0,2350	0,2517	0,2680	0,2842	0,3004	0,3166	0,3329	0,3494
	1,35	0,1906	0,2111	0,2292	0,2464	0,2630	0,2795	0,2958	0,3122	0,3286	0,3452
	1,40	0,1796	0,2040	0,2234	0,2412	0,2582	0,2749	0,2915	0,3080	0,3245	0,3412
	1,45		0,1962	0,2174	0,2360	0,2535	0,2705	0,2873	0,3040	0,3206	0,3374
	1,50		0,1865	0,2111	0,2308	0,2489	0,2663	0,2833	0,3001	0,3169	0,3338
0,2	1,00	0,2702	0,2852	0,3003	0,3155	0,3308	0,3462	0,3618	0,3776	0,3937	0,4100
	1,05	0,2610	0,2763	0,2916	0,3070	0,3225	0,3381	0,3538	0,3697	0,3859	0,4023
	1,10	0,2518	0,2676	0,2832	0,2989	0,3145	0,3303	0,3462	0,3622	0,3785	0,3950
	1,15	0,2424	0,2588	0,2749	0,2909	0,3068	0,3228	0,3389	0,3551	0,3714	0,3880
	1,20	0,2326	0,2499	0,2666	0,2830	0,2993	0,3156	0,3318	0,3482	0,3647	0,3815
	1,25	0,2217	0,2406	0,2582	0,2752	0,2920	0,3085	0,3250	0,3416	0,3583	0,3752
	1,30	0,2082	0,2305	0,2496	0,2674	0,2847	0,3016	0,3184	0,3352	0,3521	0,3691
	1,35	0,1777	0,2186	0,2403	0,2594	0,2774	0,2948	0,3120	0,3291	0,3462	0,3633
	1,40	0,1668	0,1979	0,2299	0,2510	0,2700	0,2881	0,3057	0,3231	0,3404	0,3578
	1,45		0,1641	0,2163	0,2419	0,2624	0,2813	0,2994	0,3172	0,3348	0,3524
	1,50			0,1604	0,2313	0,2544	0,2744	0,2932	0,3114	0,3294	0,3472
0,25	1,00	0,3002	0,3151	0,3302	0,3453	0,3606	0,3761	0,3918	0,4076	0,4238	0,4404
	1,05	0,2900	0,3052	0,3204	0,3357	0,3512	0,3668	0,3826	0,3985	0,4148	0,4314
	1,10	0,2798	0,2953	0,3108	0,3263	0,3420	0,3578	0,3737	0,3898	0,4062	0,4229
	1,15	0,2693	0,2853	0,3012	0,3171	0,3330	0,3490	0,3651	0,3814	0,3979	0,4147
	1,20	0,2583	0,2751	0,2915	0,3078	0,3241	0,3404	0,3567	0,3732	0,3899	0,4068
	1,25	0,2461	0,2643	0,2816	0,2985	0,3153	0,3319	0,3485	0,3652	0,3821	0,3992
	1,30	0,2311	0,2523	0,2712	0,2890	0,3064	0,3234	0,3404	0,3574	0,3745	0,3918
	1,35	0,2162	0,2376	0,2596	0,2790	0,2972	0,3150	0,3324	0,3498	0,3672	0,3847
	1,40	0,2098	0,2171	0,2456	0,2680	0,2878	0,3064	0,3244	0,3422	0,3599	0,3777
	1,45	0,2010	0,2102	0,2181	0,2551	0,2775	0,2974	0,3163	0,3347	0,3528	0,3709
	1,50		0,1990	0,2106	0,2339	0,2658	0,2880	0,3080	0,3271	0,3457	0,3642
0,3	1,00	0,3299	0,3448	0,3598	0,3749	0,3901	0,4056	0,4212	0,4370	0,4533	0,4701
	1,05	0,3194	0,3344	0,3495	0,3647	0,3801	0,3956	0,4113	0,4273	0,4436	0,4604
	1,10	0,3089	0,3241	0,3393	0,3547	0,3702	0,3859	0,4018	0,4178	0,4342	0,4510
	1,15	0,2981	0,3137	0,3292	0,3448	0,3605	0,3764	0,3924	0,4086	0,4251	0,4420
	1,20	0,2870	0,3030	0,3190	0,3349	0,3509	0,3670	0,3832	0,3996	0,4163	0,4333
	1,25	0,2751	0,2919	0,3085	0,3249	0,3413	0,3577	0,3741	0,3908	0,4076	0,4247
	1,30	0,2616	0,2800	0,2975	0,3146	0,3315	0,3483	0,3651	0,3820	0,3991	0,4164
	1,35	0,2519	0,2662	0,2856	0,3038	0,3215	0,3389	0,3561	0,3734	0,3907	0,4083
	1,40	0,2463	0,2531	0,2716	0,2920	0,3109	0,3291	0,3470	0,3647	0,3824	0,4003
	1,45	0,2402	0,2473	0,2542	0,2782	0,2995	0,3190	0,3377	0,3560	0,3741	0,3923
	1,50	0,2328	0,2407	0,2482	0,2578	0,2861	0,3079	0,3279	0,3471	0,3658	0,3844

μ_{lu} pour S 500 C ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 12

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2247	0,2378	0,2512	0,2648	0,2787	0,2927	0,3071	0,3217	0,3365	0,3517
0,05	1,00	0,2328	0,2470	0,2613	0,2758	0,2905	0,3053	0,3205	0,3358	0,3514	0,3673
	1,05	0,2313	0,2454	0,2597	0,2742	0,2889	0,3038	0,3189	0,3343	0,3499	0,3658
	1,10	0,2299	0,2440	0,2583	0,2728	0,2875	0,3024	0,3175	0,3329	0,3485	0,3644
	1,15	0,2286	0,2427	0,2571	0,2716	0,2863	0,3012	0,3163	0,3316	0,3472	0,3631
	1,20	0,2273	0,2415	0,2559	0,2704	0,2851	0,3000	0,3151	0,3305	0,3461	0,3620
	1,25	0,2262	0,2404	0,2548	0,2693	0,2840	0,2989	0,3140	0,3294	0,3450	0,3609
	1,30	0,2252	0,2394	0,2538	0,2683	0,2830	0,2979	0,3130	0,3284	0,3440	0,3599
	1,35	0,2242	0,2384	0,2528	0,2673	0,2821	0,2970	0,3121	0,3274	0,3431	0,3590
	1,40	0,2233	0,2376	0,2519	0,2665	0,2812	0,2961	0,3112	0,3266	0,3422	0,3581
	1,45	0,2225	0,2367	0,2511	0,2656	0,2804	0,2953	0,3104	0,3258	0,3414	0,3573
	1,50	0,2217	0,2359	0,2503	0,2649	0,2796	0,2945	0,3097	0,3250	0,3406	0,3565
0,1	1,00	0,2447	0,2598	0,2750	0,2904	0,3058	0,3214	0,3372	0,3532	0,3694	0,3859
	1,05	0,2411	0,2563	0,2716	0,2870	0,3025	0,3181	0,3339	0,3499	0,3662	0,3827
	1,10	0,2377	0,2530	0,2684	0,2838	0,2994	0,3150	0,3309	0,3469	0,3632	0,3798
	1,15	0,2345	0,2499	0,2654	0,2809	0,2965	0,3122	0,3281	0,3442	0,3605	0,3771
	1,20	0,2315	0,2470	0,2626	0,2781	0,2938	0,3096	0,3255	0,3416	0,3580	0,3746
	1,25	0,2287	0,2443	0,2599	0,2756	0,2913	0,3071	0,3231	0,3392	0,3556	0,3722
	1,30	0,2260	0,2418	0,2575	0,2732	0,2890	0,3048	0,3208	0,3370	0,3534	0,3701
	1,35	0,2235	0,2394	0,2552	0,2710	0,2868	0,3027	0,3187	0,3349	0,3514	0,3680
	1,40	0,2211	0,2371	0,2530	0,2688	0,2847	0,3007	0,3168	0,3330	0,3494	0,3661
	1,45	0,2189	0,2350	0,2509	0,2668	0,2828	0,2988	0,3149	0,3312	0,3476	0,3643
	1,50	0,2167	0,2329	0,2490	0,2650	0,2809	0,2970	0,3131	0,3294	0,3459	0,3627
0,15	1,00	0,2615	0,2773	0,2931	0,3090	0,3250	0,3411	0,3573	0,3737	0,3904	0,4074
	1,05	0,2554	0,2715	0,2875	0,3036	0,3197	0,3359	0,3522	0,3687	0,3855	0,4025
	1,10	0,2496	0,2660	0,2822	0,2985	0,3147	0,3310	0,3475	0,3641	0,3809	0,3980
	1,15	0,2439	0,2607	0,2772	0,2936	0,3100	0,3265	0,3430	0,3597	0,3766	0,3937
	1,20	0,2384	0,2556	0,2724	0,2890	0,3056	0,3222	0,3388	0,3556	0,3726	0,3898
	1,25	0,2330	0,2506	0,2677	0,2846	0,3014	0,3181	0,3349	0,3517	0,3688	0,3861
	1,30	0,2276	0,2458	0,2633	0,2804	0,2974	0,3142	0,3311	0,3481	0,3652	0,3826
	1,35	0,2221	0,2410	0,2590	0,2764	0,2935	0,3106	0,3276	0,3447	0,3619	0,3793
	1,40	0,2165	0,2364	0,2548	0,2725	0,2899	0,3071	0,3242	0,3414	0,3587	0,3762
	1,45	0,2107	0,2317	0,2507	0,2687	0,2864	0,3037	0,3210	0,3383	0,3557	0,3733
	1,50	0,2043	0,2270	0,2466	0,2651	0,2830	0,3005	0,3180	0,3354	0,3529	0,3705
0,2	1,00	0,2832	0,2992	0,3153	0,3314	0,3475	0,3638	0,3802	0,3968	0,4137	0,4310
	1,05	0,2750	0,2915	0,3078	0,3241	0,3405	0,3569	0,3735	0,3902	0,4072	0,4246
	1,10	0,2669	0,2838	0,3005	0,3171	0,3337	0,3504	0,3671	0,3840	0,4011	0,4186
	1,15	0,2587	0,2763	0,2934	0,3104	0,3273	0,3441	0,3611	0,3781	0,3954	0,4129
	1,20	0,2503	0,2687	0,2865	0,3039	0,3210	0,3382	0,3553	0,3725	0,3899	0,4076
	1,25	0,2413	0,2610	0,2795	0,2974	0,3150	0,3324	0,3498	0,3672	0,3847	0,4025
	1,30	0,2311	0,2530	0,2726	0,2911	0,3091	0,3268	0,3444	0,3620	0,3798	0,3977
	1,35	0,2177	0,2444	0,2655	0,2848	0,3033	0,3214	0,3393	0,3571	0,3750	0,3931
	1,40		0,2345	0,2581	0,2785	0,2976	0,3162	0,3343	0,3524	0,3705	0,3887
	1,45		0,2206	0,2501	0,2720	0,2920	0,3110	0,3295	0,3479	0,3661	0,3845
	1,50			0,2410	0,2654	0,2863	0,3059	0,3249	0,3435	0,3619	0,3804
0,25	1,00	0,3083	0,3242	0,3401	0,3561	0,3722	0,3884	0,4047	0,4213	0,4383	0,4557
	1,05	0,2988	0,3151	0,3313	0,3475	0,3638	0,3802	0,3968	0,4136	0,4306	0,4482
	1,10	0,2892	0,3060	0,3226	0,3392	0,3558	0,3724	0,3892	0,4061	0,4234	0,4410
	1,15	0,2793	0,2968	0,3140	0,3310	0,3479	0,3648	0,3818	0,3990	0,4164	0,4341
	1,20	0,2688	0,2874	0,3053	0,3228	0,3402	0,3574	0,3747	0,3921	0,4097	0,4276
	1,25	0,2569	0,2774	0,2964	0,3147	0,3325	0,3502	0,3678	0,3854	0,4032	0,4213
	1,30	0,2414	0,2664	0,2871	0,3064	0,3249	0,3430	0,3610	0,3789	0,3970	0,4152
	1,35	0,2153	0,2528	0,2770	0,2978	0,3172	0,3359	0,3543	0,3726	0,3909	0,4094
	1,40	0,2032	0,2164	0,2653	0,2887	0,3093	0,3288	0,3478	0,3664	0,3850	0,4037
	1,45		0,2002	0,2481	0,2785	0,3011	0,3217	0,3413	0,3604	0,3793	0,3983
	1,50			0,1953	0,2661	0,2924	0,3143	0,3347	0,3544	0,3737	0,3930
0,3	1,00	0,3346	0,3502	0,3658	0,3816	0,3974	0,4134	0,4296	0,4461	0,4630	0,4803
	1,05	0,3246	0,3404	0,3563	0,3723	0,3884	0,4046	0,4209	0,4376	0,4546	0,4723
	1,10	0,3144	0,3306	0,3469	0,3631	0,3795	0,3959	0,4125	0,4293	0,4465	0,4643
	1,15	0,3038	0,3207	0,3374	0,3540	0,3707	0,3874	0,4043	0,4213	0,4387	0,4565
	1,20	0,2926	0,3104	0,3278	0,3449	0,3620	0,3791	0,3962	0,4135	0,4311	0,4490
	1,25	0,2802	0,2994	0,3178	0,3357	0,3533	0,3708	0,3883	0,4059	0,4236	0,4418
	1,30	0,2645	0,2872	0,3072	0,3261	0,3444	0,3625	0,3804	0,3983	0,4164	0,4348
	1,35	0,2514	0,2718	0,2954	0,3160	0,3354	0,3541	0,3726	0,3909	0,4093	0,4279
	1,40	0,2443	0,2527	0,2809	0,3049	0,3258	0,3456	0,3647	0,3835	0,4023	0,4212
	1,45	0,2336	0,2450	0,2540	0,2916	0,3155	0,3367	0,3567	0,3761	0,3954	0,4146
	1,50		0,2298	0,2456	0,2697	0,3037	0,3272	0,3485	0,3687	0,3885	0,4082

μ_{lu} pour S 500 C ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 15

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2479	0,2619	0,2760	0,2904	0,3049	0,3198	0,3348	0,3501	0,3658	0,3817
0,05	1,00	0,2547	0,2694	0,2844	0,2995	0,3148	0,3303	0,3460	0,3619	0,3782	0,3947
	1,05	0,2534	0,2681	0,2831	0,2982	0,3135	0,3290	0,3447	0,3607	0,3769	0,3935
	1,10	0,2522	0,2670	0,2819	0,2970	0,3123	0,3278	0,3436	0,3595	0,3758	0,3924
	1,15	0,2511	0,2659	0,2808	0,2960	0,3113	0,3268	0,3425	0,3585	0,3747	0,3913
	1,20	0,2501	0,2649	0,2799	0,2950	0,3103	0,3258	0,3415	0,3575	0,3738	0,3904
	1,25	0,2492	0,2640	0,2789	0,2941	0,3094	0,3249	0,3407	0,3566	0,3729	0,3895
	1,30	0,2483	0,2631	0,2781	0,2932	0,3086	0,3241	0,3398	0,3558	0,3721	0,3886
	1,35	0,2475	0,2623	0,2773	0,2925	0,3078	0,3233	0,3391	0,3550	0,3713	0,3879
	1,40	0,2468	0,2616	0,2766	0,2917	0,3071	0,3226	0,3383	0,3543	0,3706	0,3872
	1,45	0,2461	0,2609	0,2759	0,2911	0,3064	0,3219	0,3377	0,3537	0,3699	0,3865
	1,50	0,2454	0,2603	0,2753	0,2904	0,3058	0,3213	0,3371	0,3530	0,3693	0,3859
0,1	1,00	0,2641	0,2798	0,2955	0,3113	0,3273	0,3434	0,3597	0,3762	0,3929	0,4101
	1,05	0,2611	0,2768	0,2926	0,3085	0,3245	0,3406	0,3570	0,3735	0,3903	0,4074
	1,10	0,2583	0,2741	0,2899	0,3059	0,3219	0,3381	0,3545	0,3710	0,3879	0,4050
	1,15	0,2557	0,2716	0,2875	0,3035	0,3195	0,3358	0,3522	0,3688	0,3856	0,4028
	1,20	0,2533	0,2692	0,2852	0,3012	0,3173	0,3336	0,3500	0,3667	0,3835	0,4007
	1,25	0,2510	0,2670	0,2830	0,2991	0,3153	0,3316	0,3481	0,3647	0,3816	0,3988
	1,30	0,2489	0,2649	0,2810	0,2972	0,3134	0,3297	0,3462	0,3629	0,3798	0,3971
	1,35	0,2468	0,2630	0,2792	0,2953	0,3116	0,3280	0,3445	0,3612	0,3781	0,3954
	1,40	0,2450	0,2612	0,2774	0,2936	0,3099	0,3263	0,3429	0,3596	0,3766	0,3938
	1,45	0,2432	0,2595	0,2757	0,2920	0,3084	0,3248	0,3414	0,3581	0,3751	0,3924
	1,50	0,2415	0,2579	0,2742	0,2905	0,3069	0,3233	0,3399	0,3567	0,3737	0,3910
0,15	1,00	0,2773	0,2936	0,3100	0,3263	0,3428	0,3593	0,3760	0,3929	0,4101	0,4276
	1,05	0,2722	0,2888	0,3053	0,3218	0,3383	0,3550	0,3718	0,3887	0,4060	0,4236
	1,10	0,2673	0,2841	0,3008	0,3175	0,3342	0,3509	0,3678	0,3849	0,4022	0,4198
	1,15	0,2627	0,2798	0,2967	0,3135	0,3303	0,3472	0,3641	0,3813	0,3986	0,4164
	1,20	0,2582	0,2756	0,2927	0,3097	0,3266	0,3436	0,3607	0,3779	0,3953	0,4131
	1,25	0,2539	0,2716	0,2889	0,3061	0,3232	0,3403	0,3574	0,3747	0,3923	0,4101
	1,30	0,2498	0,2678	0,2854	0,3027	0,3199	0,3371	0,3544	0,3718	0,3894	0,4072
	1,35	0,2457	0,2641	0,2819	0,2995	0,3168	0,3342	0,3515	0,3690	0,3866	0,4046
	1,40	0,2417	0,2606	0,2787	0,2964	0,3139	0,3314	0,3488	0,3664	0,3841	0,4020
	1,45	0,2378	0,2571	0,2755	0,2934	0,3111	0,3287	0,3462	0,3639	0,3816	0,3997
	1,50	0,2339	0,2538	0,2725	0,2906	0,3085	0,3262	0,3438	0,3615	0,3794	0,3974
0,2	1,00	0,2947	0,3114	0,3280	0,3445	0,3612	0,3779	0,3948	0,4119	0,4292	0,4471
	1,05	0,2875	0,3046	0,3215	0,3383	0,3551	0,3721	0,3891	0,4063	0,4238	0,4417
	1,10	0,2805	0,2980	0,3152	0,3323	0,3494	0,3665	0,3837	0,4011	0,4187	0,4367
	1,15	0,2735	0,2915	0,3092	0,3266	0,3440	0,3613	0,3786	0,3961	0,4139	0,4320
	1,20	0,2664	0,2852	0,3033	0,3211	0,3387	0,3563	0,3738	0,3915	0,4093	0,4275
	1,25	0,2592	0,2789	0,2976	0,3158	0,3337	0,3515	0,3692	0,3870	0,4050	0,4233
	1,30	0,2516	0,2725	0,2920	0,3106	0,3289	0,3469	0,3648	0,3828	0,4010	0,4194
	1,35	0,2432	0,2661	0,2864	0,3056	0,3242	0,3425	0,3607	0,3788	0,3971	0,4156
	1,40	0,2331	0,2593	0,2808	0,3006	0,3196	0,3382	0,3566	0,3750	0,3934	0,4120
	1,45		0,2520	0,2751	0,2957	0,3152	0,3341	0,3528	0,3713	0,3899	0,4086
	1,50		0,2437	0,2693	0,2908	0,3109	0,3302	0,3491	0,3678	0,3865	0,4054
0,25	1,00	0,3158	0,3323	0,3488	0,3653	0,3818	0,3985	0,4153	0,4324	0,4498	0,4678
	1,05	0,3071	0,3241	0,3409	0,3577	0,3745	0,3914	0,4084	0,4257	0,4432	0,4614
	1,10	0,2983	0,3159	0,3332	0,3503	0,3675	0,3846	0,4019	0,4193	0,4370	0,4552
	1,15	0,2893	0,3076	0,3255	0,3431	0,3606	0,3780	0,3955	0,4132	0,4311	0,4494
	1,20	0,2797	0,2993	0,3179	0,3360	0,3539	0,3717	0,3895	0,4073	0,4254	0,4439
	1,25	0,2692	0,2905	0,3102	0,3290	0,3474	0,3655	0,3836	0,4017	0,4200	0,4386
	1,30	0,2561	0,2811	0,3022	0,3219	0,3409	0,3595	0,3779	0,3963	0,4148	0,4336
	1,35	0,2138	0,2703	0,2939	0,3148	0,3345	0,3536	0,3723	0,3910	0,4097	0,4287
	1,40		0,2554	0,2848	0,3074	0,3280	0,3477	0,3669	0,3859	0,4049	0,4241
	1,45			0,2742	0,2997	0,3215	0,3419	0,3616	0,3810	0,4002	0,4196
	1,50			0,2584	0,2913	0,3149	0,3361	0,3564	0,3761	0,3957	0,4153
0,3	1,00	0,3390	0,3551	0,3712	0,3874	0,4037	0,4200	0,4366	0,4535	0,4708	0,4839
	1,05	0,3295	0,3460	0,3625	0,3790	0,3955	0,4121	0,4289	0,4460	0,4635	0,4808
	1,10	0,3198	0,3369	0,3538	0,3707	0,3875	0,4045	0,4215	0,4388	0,4565	0,4749
	1,15	0,3097	0,3276	0,3451	0,3624	0,3797	0,3969	0,4143	0,4318	0,4497	0,4682
	1,20	0,2989	0,3179	0,3362	0,3542	0,3719	0,3895	0,4072	0,4250	0,4431	0,4618
	1,25	0,2864	0,3075	0,3271	0,3458	0,3641	0,3822	0,4003	0,4184	0,4368	0,4556
	1,30	0,2696	0,2958	0,3174	0,3372	0,3563	0,3750	0,3935	0,4120	0,4306	0,4496
	1,35	0,2506	0,2808	0,3066	0,3282	0,3484	0,3677	0,3867	0,4056	0,4245	0,4438
	1,40	0,2396	0,2521	0,2936	0,3185	0,3401	0,3604	0,3800	0,3994	0,4187	0,4382
	1,45		0,2382	0,2538	0,3073	0,3314	0,3529	0,3733	0,3932	0,4129	0,4327
	1,50			0,2359	0,2924	0,3218	0,3451	0,3665	0,3870	0,4072	0,4273

μ_{lu} pour S 500 C ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 18

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2661	0,2805	0,2952	0,3100	0,3251	0,3404	0,3559	0,3717	0,3878	0,4043
0,05	1,00	0,2718	0,2870	0,3023	0,3178	0,3335	0,3493	0,3654	0,3818	0,3984	0,4154
	1,05	0,2707	0,2859	0,3012	0,3167	0,3324	0,3483	0,3644	0,3807	0,3973	0,4144
	1,10	0,2697	0,2848	0,3002	0,3157	0,3314	0,3473	0,3634	0,3797	0,3964	0,4134
	1,15	0,2687	0,2839	0,2993	0,3148	0,3305	0,3464	0,3625	0,3788	0,3955	0,4125
	1,20	0,2679	0,2831	0,2984	0,3140	0,3297	0,3456	0,3617	0,3780	0,3947	0,4117
	1,25	0,2671	0,2823	0,2977	0,3132	0,3289	0,3448	0,3609	0,3773	0,3939	0,4110
	1,30	0,2663	0,2816	0,2969	0,3125	0,3282	0,3441	0,3602	0,3766	0,3932	0,4103
	1,35	0,2657	0,2809	0,2963	0,3118	0,3275	0,3434	0,3596	0,3759	0,3926	0,4096
	1,40	0,2650	0,2803	0,2956	0,3112	0,3269	0,3428	0,3590	0,3753	0,3920	0,4090
	1,45	0,2644	0,2797	0,2951	0,3106	0,3263	0,3423	0,3584	0,3748	0,3914	0,4085
	1,50	0,2639	0,2791	0,2945	0,3101	0,3258	0,3417	0,3579	0,3742	0,3909	0,4080
0,1	1,00	0,2796	0,2956	0,3116	0,3277	0,3440	0,3604	0,3770	0,3938	0,4109	0,4284
	1,05	0,2770	0,2931	0,3091	0,3253	0,3416	0,3580	0,3747	0,3915	0,4086	0,4262
	1,10	0,2747	0,2907	0,3069	0,3231	0,3394	0,3559	0,3726	0,3894	0,4066	0,4241
	1,15	0,2725	0,2886	0,3048	0,3210	0,3374	0,3539	0,3706	0,3875	0,4047	0,4223
	1,20	0,2704	0,2866	0,3028	0,3191	0,3356	0,3521	0,3688	0,3857	0,4030	0,4205
	1,25	0,2685	0,2848	0,3010	0,3174	0,3338	0,3504	0,3671	0,3841	0,4013	0,4189
	1,30	0,2667	0,2830	0,2994	0,3157	0,3322	0,3488	0,3656	0,3826	0,3998	0,4174
	1,35	0,2650	0,2814	0,2978	0,3142	0,3307	0,3474	0,3642	0,3812	0,3984	0,4161
	1,40	0,2635	0,2799	0,2963	0,3128	0,3293	0,3460	0,3628	0,3798	0,3971	0,4148
	1,45	0,2620	0,2785	0,2949	0,3114	0,3280	0,3447	0,3615	0,3786	0,3959	0,4135
	1,50	0,2606	0,2771	0,2936	0,3102	0,3268	0,3435	0,3603	0,3774	0,3947	0,4124
0,15	1,00	0,2904	0,3070	0,3236	0,3402	0,3569	0,3737	0,3907	0,4078	0,4253	0,4432
	1,05	0,2860	0,3028	0,3195	0,3363	0,3531	0,3700	0,3870	0,4043	0,4218	0,4398
	1,10	0,2819	0,2989	0,3158	0,3327	0,3496	0,3666	0,3837	0,4010	0,4186	0,4366
	1,15	0,2780	0,2952	0,3122	0,3292	0,3463	0,3634	0,3806	0,3980	0,4156	0,4337
	1,20	0,2742	0,2917	0,3089	0,3260	0,3432	0,3604	0,3777	0,3951	0,4129	0,4310
	1,25	0,2707	0,2883	0,3058	0,3230	0,3403	0,3576	0,3749	0,3925	0,4103	0,4284
	1,30	0,2673	0,2852	0,3028	0,3202	0,3376	0,3549	0,3724	0,3900	0,4078	0,4260
	1,35	0,2641	0,2822	0,3000	0,3175	0,3350	0,3525	0,3700	0,3877	0,4055	0,4238
	1,40	0,2609	0,2793	0,2973	0,3150	0,3326	0,3501	0,3677	0,3855	0,4034	0,4217
	1,45	0,2579	0,2766	0,2947	0,3126	0,3303	0,3479	0,3656	0,3834	0,4014	0,4197
	1,50	0,2550	0,2739	0,2923	0,3103	0,3281	0,3458	0,3636	0,3814	0,3995	0,4179
0,2	1,00	0,3047	0,3217	0,3386	0,3554	0,3723	0,3893	0,4064	0,4238	0,4415	0,4597
	1,05	0,2984	0,3157	0,3329	0,3500	0,3671	0,3843	0,4015	0,4190	0,4368	0,4551
	1,10	0,2923	0,3100	0,3275	0,3449	0,3622	0,3795	0,3969	0,4146	0,4325	0,4508
	1,15	0,2863	0,3045	0,3223	0,3400	0,3575	0,3750	0,3926	0,4104	0,4284	0,4468
	1,20	0,2803	0,2991	0,3173	0,3353	0,3530	0,3708	0,3885	0,4064	0,4245	0,4431
	1,25	0,2744	0,2938	0,3125	0,3308	0,3488	0,3667	0,3846	0,4027	0,4209	0,4395
	1,30	0,2684	0,2886	0,3078	0,3264	0,3447	0,3629	0,3809	0,3991	0,4175	0,4362
	1,35	0,2622	0,2835	0,3033	0,3223	0,3408	0,3592	0,3774	0,3957	0,4142	0,4330
	1,40	0,2556	0,2783	0,2988	0,3182	0,3371	0,3557	0,3741	0,3926	0,4111	0,4301
	1,45	0,2484	0,2731	0,2944	0,3143	0,3335	0,3523	0,3709	0,3895	0,4082	0,4272
	1,50	0,2398	0,2677	0,2900	0,3104	0,3300	0,3490	0,3679	0,3866	0,4054	0,4245
0,25	1,00	0,3226	0,3395	0,3563	0,3731	0,3900	0,4069	0,4239	0,4413	0,4590	0,4776
	1,05	0,3147	0,3320	0,3493	0,3664	0,3835	0,4007	0,4179	0,4354	0,4533	0,4719
	1,10	0,3067	0,3247	0,3424	0,3599	0,3773	0,3947	0,4122	0,4299	0,4479	0,4666
	1,15	0,2986	0,3174	0,3356	0,3535	0,3713	0,3890	0,4067	0,4246	0,4428	0,4616
	1,20	0,2902	0,3100	0,3289	0,3473	0,3655	0,3835	0,4015	0,4196	0,4380	0,4569
	1,25	0,2811	0,3025	0,3223	0,3413	0,3598	0,3782	0,3964	0,4148	0,4333	0,4523
	1,30	0,2707	0,2946	0,3155	0,3352	0,3543	0,3730	0,3916	0,4102	0,4289	0,4481
	1,35	0,2563	0,2860	0,3086	0,3292	0,3489	0,3680	0,3869	0,4057	0,4247	0,4440
	1,40		0,2761	0,3015	0,3232	0,3435	0,3631	0,3824	0,4015	0,4206	0,4401
	1,45		0,2622	0,2937	0,3171	0,3382	0,3584	0,3780	0,3973	0,4167	0,4363
	1,50			0,2850	0,3108	0,3329	0,3537	0,3737	0,3933	0,4129	0,4327
0,3	1,00	0,3431	0,3595	0,3760	0,3925	0,4090	0,4256	0,4424	0,4595	0,4773	0,4868
	1,05	0,3341	0,3511	0,3680	0,3848	0,4017	0,4186	0,4356	0,4530	0,4708	0,4840
	1,10	0,3250	0,3427	0,3600	0,3773	0,3945	0,4117	0,4290	0,4466	0,4646	0,4815
	1,15	0,3155	0,3340	0,3521	0,3698	0,3874	0,4050	0,4226	0,4405	0,4587	0,4778
	1,20	0,3053	0,3251	0,3440	0,3624	0,3805	0,3985	0,4164	0,4345	0,4530	0,4722
	1,25	0,2935	0,3156	0,3358	0,3549	0,3736	0,3921	0,4104	0,4288	0,4475	0,4668
	1,30	0,2775	0,3050	0,3271	0,3474	0,3668	0,3857	0,4045	0,4232	0,4421	0,4616
	1,35	0,2494	0,2918	0,3177	0,3395	0,3598	0,3794	0,3987	0,4177	0,4370	0,4566
	1,40		0,2511	0,3068	0,3312	0,3528	0,3732	0,3929	0,4124	0,4319	0,4518
	1,45			0,2918	0,3221	0,3455	0,3668	0,3872	0,4072	0,4270	0,4472
	1,50				0,3114	0,3378	0,3604	0,3816	0,4020	0,4223	0,4426

μ_{lu} pour S 500 C ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 21

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2806	0,2954	0,3104	0,3256	0,3409	0,3565	0,3724	0,3885	0,4049	0,4218
0,05	1,00	0,2855	0,3010	0,3166	0,3323	0,3482	0,3643	0,3807	0,3973	0,4142	0,4315
	1,05	0,2846	0,3000	0,3156	0,3314	0,3473	0,3634	0,3797	0,3963	0,4132	0,4306
	1,10	0,2837	0,2991	0,3147	0,3305	0,3464	0,3626	0,3789	0,3955	0,4124	0,4298
	1,15	0,2828	0,2983	0,3139	0,3297	0,3457	0,3618	0,3781	0,3947	0,4117	0,4290
	1,20	0,2821	0,2976	0,3132	0,3290	0,3449	0,3611	0,3774	0,3940	0,4110	0,4283
	1,25	0,2814	0,2969	0,3125	0,3283	0,3443	0,3604	0,3768	0,3934	0,4103	0,4277
	1,30	0,2808	0,2963	0,3119	0,3277	0,3436	0,3598	0,3762	0,3928	0,4097	0,4271
	1,35	0,2802	0,2957	0,3113	0,3271	0,3431	0,3592	0,3756	0,3922	0,4092	0,4265
	1,40	0,2796	0,2951	0,3108	0,3266	0,3425	0,3587	0,3751	0,3917	0,4086	0,4260
	1,45	0,2791	0,2946	0,3103	0,3261	0,3420	0,3582	0,3746	0,3912	0,4082	0,4255
	1,50	0,2786	0,2941	0,3098	0,3256	0,3416	0,3577	0,3741	0,3908	0,4077	0,4251
0,1	1,00	0,2922	0,3083	0,3245	0,3408	0,3573	0,3738	0,3906	0,4076	0,4249	0,4427
	1,05	0,2899	0,3061	0,3224	0,3387	0,3552	0,3718	0,3886	0,4057	0,4230	0,4408
	1,10	0,2879	0,3041	0,3204	0,3368	0,3533	0,3700	0,3868	0,4039	0,4212	0,4391
	1,15	0,2860	0,3023	0,3186	0,3351	0,3516	0,3683	0,3851	0,4022	0,4196	0,4375
	1,20	0,2842	0,3006	0,3170	0,3334	0,3500	0,3667	0,3836	0,4007	0,4181	0,4360
	1,25	0,2826	0,2990	0,3154	0,3319	0,3485	0,3652	0,3821	0,3993	0,4167	0,4346
	1,30	0,2810	0,2975	0,3139	0,3305	0,3471	0,3639	0,3808	0,3980	0,4154	0,4333
	1,35	0,2796	0,2961	0,3126	0,3292	0,3458	0,3626	0,3796	0,3968	0,4142	0,4321
	1,40	0,2783	0,2948	0,3113	0,3279	0,3446	0,3614	0,3784	0,3956	0,4131	0,4310
	1,45	0,2770	0,2936	0,3101	0,3268	0,3435	0,3603	0,3773	0,3945	0,4121	0,4300
	1,50	0,2758	0,2924	0,3090	0,3257	0,3424	0,3593	0,3763	0,3935	0,4111	0,4290
0,15	1,00	0,3012	0,3180	0,3347	0,3515	0,3683	0,3852	0,4023	0,4197	0,4373	0,4555
	1,05	0,2974	0,3143	0,3312	0,3481	0,3650	0,3820	0,3992	0,4166	0,4343	0,4526
	1,10	0,2938	0,3109	0,3279	0,3449	0,3620	0,3791	0,3963	0,4138	0,4316	0,4499
	1,15	0,2905	0,3077	0,3249	0,3420	0,3591	0,3763	0,3936	0,4112	0,4290	0,4473
	1,20	0,2873	0,3047	0,3220	0,3392	0,3564	0,3737	0,3911	0,4087	0,4266	0,4450
	1,25	0,2843	0,3019	0,3193	0,3366	0,3540	0,3713	0,3888	0,4065	0,4244	0,4428
	1,30	0,2814	0,2992	0,3168	0,3342	0,3516	0,3691	0,3866	0,4043	0,4223	0,4407
	1,35	0,2787	0,2967	0,3144	0,3319	0,3494	0,3669	0,3846	0,4023	0,4204	0,4388
	1,40	0,2761	0,2943	0,3121	0,3298	0,3474	0,3650	0,3826	0,4005	0,4185	0,4370
	1,45	0,2736	0,2920	0,3100	0,3277	0,3454	0,3631	0,3808	0,3987	0,4168	0,4353
	1,50	0,2713	0,2898	0,3079	0,3258	0,3436	0,3613	0,3791	0,3970	0,4152	0,4338
0,2	1,00	0,3133	0,3304	0,3475	0,3645	0,3815	0,3987	0,4159	0,4334	0,4513	0,4699
	1,05	0,3077	0,3252	0,3425	0,3597	0,3770	0,3942	0,4116	0,4293	0,4472	0,4659
	1,10	0,3023	0,3202	0,3378	0,3552	0,3726	0,3901	0,4076	0,4254	0,4434	0,4621
	1,15	0,2971	0,3153	0,3332	0,3509	0,3686	0,3862	0,4039	0,4217	0,4399	0,4587
	1,20	0,2920	0,3107	0,3289	0,3469	0,3647	0,3825	0,4003	0,4183	0,4366	0,4554
	1,25	0,2870	0,3062	0,3248	0,3430	0,3611	0,3790	0,3970	0,4151	0,4335	0,4524
	1,30	0,2821	0,3019	0,3208	0,3393	0,3576	0,3757	0,3938	0,4121	0,4305	0,4495
	1,35	0,2772	0,2976	0,3170	0,3358	0,3543	0,3726	0,3908	0,4092	0,4278	0,4468
	1,40	0,2722	0,2934	0,3133	0,3324	0,3511	0,3696	0,3880	0,4065	0,4251	0,4442
	1,45	0,2671	0,2893	0,3097	0,3291	0,3481	0,3667	0,3853	0,4039	0,4227	0,4418
	1,50	0,2618	0,2852	0,3061	0,3259	0,3451	0,3640	0,3827	0,4014	0,4203	0,4395
0,25	1,00	0,3286	0,3458	0,3628	0,3798	0,3968	0,4139	0,4311	0,4485	0,4665	0,4823
	1,05	0,3214	0,3391	0,3565	0,3738	0,3910	0,4084	0,4258	0,4434	0,4615	0,4802
	1,10	0,3143	0,3325	0,3503	0,3680	0,3855	0,4031	0,4207	0,4386	0,4568	0,4759
	1,15	0,3070	0,3260	0,3443	0,3624	0,3802	0,3981	0,4159	0,4340	0,4523	0,4715
	1,20	0,2996	0,3195	0,3384	0,3569	0,3752	0,3933	0,4114	0,4296	0,4481	0,4673
	1,25	0,2919	0,3129	0,3326	0,3516	0,3702	0,3886	0,4070	0,4254	0,4441	0,4634
	1,30	0,2834	0,3063	0,3269	0,3464	0,3655	0,3842	0,4028	0,4214	0,4403	0,4597
	1,35	0,2735	0,2993	0,3211	0,3413	0,3608	0,3799	0,3988	0,4176	0,4366	0,4562
	1,40	0,2588	0,2918	0,3152	0,3363	0,3563	0,3757	0,3949	0,4140	0,4332	0,4528
	1,45		0,2833	0,3092	0,3313	0,3519	0,3717	0,3911	0,4104	0,4298	0,4496
	1,50		0,2723	0,3028	0,3262	0,3475	0,3678	0,3875	0,4071	0,4266	0,4465
0,3	1,00	0,3468	0,3636	0,3802	0,3969	0,4136	0,4304	0,4473	0,4646	0,4811	0,4891
	1,05	0,3385	0,3557	0,3729	0,3899	0,4069	0,4240	0,4412	0,4587	0,4768	0,4867
	1,10	0,3300	0,3479	0,3656	0,3831	0,4005	0,4179	0,4353	0,4531	0,4713	0,4844
	1,15	0,3211	0,3400	0,3584	0,3763	0,3941	0,4119	0,4297	0,4477	0,4661	0,4823
	1,20	0,3117	0,3319	0,3511	0,3697	0,3879	0,4061	0,4242	0,4424	0,4611	0,4803
	1,25	0,3009	0,3233	0,3437	0,3630	0,3818	0,4004	0,4188	0,4374	0,4562	0,4760
	1,30	0,2869	0,3139	0,3360	0,3563	0,3758	0,3948	0,4137	0,4325	0,4516	0,4714
	1,35	0,2470	0,3028	0,3278	0,3495	0,3698	0,3893	0,4086	0,4278	0,4471	0,4671
	1,40		0,2861	0,3188	0,3424	0,3637	0,3839	0,4036	0,4232	0,4428	0,4629
	1,45			0,3080	0,3349	0,3575	0,3785	0,3988	0,4187	0,4386	0,4589
	1,50			0,2902	0,3267	0,3512	0,3731	0,3940	0,4143	0,4345	0,4550

μ_{lu} pour S 500 C ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 24

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2924	0,3075	0,3227	0,3381	0,3537	0,3695	0,3856	0,4019	0,4186	0,4357
0,05	1,00	0,2968	0,3124	0,3282	0,3441	0,3602	0,3764	0,3929	0,4096	0,4267	0,4443
	1,05	0,2959	0,3116	0,3273	0,3432	0,3593	0,3756	0,3921	0,4088	0,4259	0,4435
	1,10	0,2951	0,3108	0,3266	0,3425	0,3586	0,3748	0,3913	0,4081	0,4252	0,4428
	1,15	0,2944	0,3101	0,3259	0,3418	0,3579	0,3742	0,3907	0,4074	0,4245	0,4421
	1,20	0,2937	0,3094	0,3252	0,3411	0,3572	0,3735	0,3900	0,4068	0,4239	0,4415
	1,25	0,2931	0,3088	0,3246	0,3406	0,3567	0,3730	0,3895	0,4062	0,4233	0,4409
	1,30	0,2926	0,3082	0,3241	0,3400	0,3561	0,3724	0,3889	0,4057	0,4228	0,4404
	1,35	0,2920	0,3077	0,3235	0,3395	0,3556	0,3719	0,3884	0,4052	0,4223	0,4399
	1,40	0,2916	0,3072	0,3231	0,3390	0,3551	0,3715	0,3880	0,4048	0,4219	0,4395
	1,45	0,2911	0,3068	0,3226	0,3386	0,3547	0,3710	0,3876	0,4043	0,4215	0,4391
	1,50	0,2907	0,3064	0,3222	0,3382	0,3543	0,3706	0,3872	0,4039	0,4211	0,4387
0,1	1,00	0,3025	0,3188	0,3351	0,3515	0,3681	0,3847	0,4016	0,4187	0,4362	0,4542
	1,05	0,3006	0,3169	0,3332	0,3497	0,3663	0,3830	0,3999	0,4170	0,4345	0,4525
	1,10	0,2988	0,3151	0,3315	0,3480	0,3646	0,3813	0,3983	0,4154	0,4330	0,4510
	1,15	0,2971	0,3135	0,3299	0,3464	0,3631	0,3798	0,3968	0,4140	0,4315	0,4496
	1,20	0,2955	0,3120	0,3285	0,3450	0,3617	0,3785	0,3954	0,4127	0,4302	0,4483
	1,25	0,2941	0,3106	0,3271	0,3437	0,3604	0,3772	0,3942	0,4114	0,4290	0,4471
	1,30	0,2928	0,3093	0,3258	0,3424	0,3592	0,3760	0,3930	0,4103	0,4279	0,4460
	1,35	0,2915	0,3081	0,3246	0,3413	0,3580	0,3749	0,3919	0,4092	0,4268	0,4449
	1,40	0,2903	0,3069	0,3235	0,3402	0,3570	0,3739	0,3909	0,4082	0,4259	0,4440
	1,45	0,2892	0,3058	0,3225	0,3392	0,3560	0,3729	0,3900	0,4073	0,4249	0,4431
	1,50	0,2882	0,3048	0,3215	0,3382	0,3551	0,3720	0,3891	0,4064	0,4241	0,4422
0,15	1,00	0,3103	0,3271	0,3439	0,3608	0,3777	0,3947	0,4118	0,4293	0,4470	0,4655
	1,05	0,3069	0,3239	0,3408	0,3578	0,3748	0,3919	0,4091	0,4266	0,4444	0,4629
	1,10	0,3038	0,3209	0,3380	0,3550	0,3721	0,3892	0,4066	0,4241	0,4420	0,4605
	1,15	0,3009	0,3181	0,3353	0,3524	0,3696	0,3868	0,4042	0,4218	0,4397	0,4583
	1,20	0,2981	0,3155	0,3328	0,3500	0,3673	0,3846	0,4020	0,4197	0,4377	0,4562
	1,25	0,2955	0,3130	0,3304	0,3477	0,3651	0,3825	0,4000	0,4177	0,4357	0,4543
	1,30	0,2930	0,3107	0,3282	0,3456	0,3630	0,3805	0,3981	0,4158	0,4339	0,4525
	1,35	0,2907	0,3085	0,3261	0,3436	0,3611	0,3787	0,3963	0,4141	0,4322	0,4509
	1,40	0,2885	0,3064	0,3242	0,3418	0,3593	0,3769	0,3946	0,4125	0,4306	0,4493
	1,45	0,2864	0,3045	0,3223	0,3400	0,3576	0,3753	0,3930	0,4109	0,4291	0,4478
	1,50	0,2844	0,3026	0,3206	0,3383	0,3560	0,3738	0,3916	0,4095	0,4277	0,4465
0,2	1,00	0,3206	0,3379	0,3550	0,3721	0,3892	0,4064	0,4237	0,4413	0,4593	0,4782
	1,05	0,3157	0,3332	0,3506	0,3679	0,3851	0,4025	0,4199	0,4376	0,4557	0,4746
	1,10	0,3109	0,3288	0,3464	0,3639	0,3813	0,3988	0,4164	0,4342	0,4524	0,4713
	1,15	0,3063	0,3245	0,3424	0,3601	0,3777	0,3954	0,4131	0,4310	0,4493	0,4683
	1,20	0,3019	0,3205	0,3386	0,3565	0,3744	0,3921	0,4100	0,4280	0,4464	0,4654
	1,25	0,2976	0,3166	0,3350	0,3532	0,3712	0,3891	0,4071	0,4252	0,4437	0,4627
	1,30	0,2935	0,3128	0,3316	0,3500	0,3681	0,3862	0,4043	0,4226	0,4411	0,4602
	1,35	0,2894	0,3092	0,3283	0,3469	0,3652	0,3835	0,4017	0,4201	0,4387	0,4579
	1,40	0,2853	0,3057	0,3251	0,3440	0,3625	0,3809	0,3992	0,4177	0,4364	0,4556
	1,45	0,2813	0,3023	0,3221	0,3412	0,3599	0,3784	0,3969	0,4155	0,4343	0,4535
	1,50	0,2773	0,2990	0,3191	0,3385	0,3574	0,3761	0,3947	0,4133	0,4322	0,4516
0,25	1,00	0,3340	0,3513	0,3685	0,3855	0,4026	0,4198	0,4370	0,4546	0,4727	0,4849
	1,05	0,3274	0,3452	0,3627	0,3801	0,3974	0,4148	0,4323	0,4500	0,4682	0,4831
	1,10	0,3210	0,3393	0,3572	0,3749	0,3925	0,4101	0,4278	0,4457	0,4641	0,4814
	1,15	0,3145	0,3334	0,3518	0,3699	0,3878	0,4057	0,4236	0,4416	0,4601	0,4796
	1,20	0,3080	0,3277	0,3466	0,3651	0,3833	0,4014	0,4195	0,4378	0,4564	0,4759
	1,25	0,3013	0,3220	0,3415	0,3604	0,3790	0,3973	0,4157	0,4341	0,4529	0,4725
	1,30	0,2943	0,3162	0,3365	0,3559	0,3748	0,3934	0,4120	0,4306	0,4496	0,4692
	1,35	0,2866	0,3104	0,3315	0,3515	0,3708	0,3897	0,4085	0,4273	0,4464	0,4661
	1,40	0,2776	0,3044	0,3266	0,3472	0,3669	0,3861	0,4051	0,4241	0,4434	0,4632
	1,45	0,2646	0,2980	0,3216	0,3429	0,3631	0,3826	0,4019	0,4211	0,4405	0,4604
	1,50		0,2909	0,3166	0,3387	0,3594	0,3793	0,3988	0,4182	0,4377	0,4577
0,3	1,00	0,3502	0,3671	0,3840	0,4008	0,4176	0,4345	0,4515	0,4688	0,4830	0,4911
	1,05	0,3424	0,3599	0,3772	0,3944	0,4115	0,4287	0,4460	0,4635	0,4808	0,4889
	1,10	0,3345	0,3527	0,3705	0,3881	0,4056	0,4231	0,4407	0,4585	0,4769	0,4868
	1,15	0,3264	0,3455	0,3639	0,3820	0,3999	0,4177	0,4356	0,4537	0,4722	0,4849
	1,20	0,3177	0,3381	0,3573	0,3760	0,3944	0,4125	0,4307	0,4490	0,4678	0,4831
	1,25	0,3080	0,3304	0,3507	0,3701	0,3889	0,4075	0,4260	0,4445	0,4635	0,4814
	1,30	0,2961	0,3221	0,3439	0,3641	0,3835	0,4025	0,4214	0,4402	0,4594	0,4796
	1,35	0,2413	0,3128	0,3368	0,3581	0,3782	0,3977	0,4169	0,4361	0,4555	0,4757
	1,40		0,3010	0,3292	0,3520	0,3729	0,3930	0,4126	0,4320	0,4517	0,4720
	1,45			0,3208	0,3457	0,3677	0,3883	0,4084	0,4281	0,4480	0,4685
	1,50			0,3104	0,3391	0,3623	0,3837	0,4042	0,4244	0,4445	0,4651

μ_{lu} pour S 500 C ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 27

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,3023	0,3175	0,3329	0,3485	0,3642	0,3802	0,3963	0,4128	0,4296	0,4470
0,05	1,00	0,3062	0,3219	0,3378	0,3538	0,3700	0,3863	0,4029	0,4197	0,4369	0,4547
	1,05	0,3054	0,3211	0,3370	0,3530	0,3692	0,3856	0,4022	0,4190	0,4362	0,4540
	1,10	0,3047	0,3204	0,3363	0,3524	0,3686	0,3849	0,4015	0,4184	0,4356	0,4534
	1,15	0,3040	0,3198	0,3357	0,3517	0,3679	0,3843	0,4009	0,4178	0,4350	0,4528
	1,20	0,3034	0,3192	0,3351	0,3512	0,3674	0,3838	0,4003	0,4172	0,4345	0,4522
	1,25	0,3029	0,3187	0,3346	0,3506	0,3668	0,3832	0,3998	0,4167	0,4340	0,4517
	1,30	0,3024	0,3182	0,3341	0,3502	0,3664	0,3828	0,3994	0,4162	0,4335	0,4513
	1,35	0,3019	0,3177	0,3336	0,3497	0,3659	0,3823	0,3989	0,4158	0,4331	0,4508
	1,40	0,3015	0,3173	0,3332	0,3493	0,3655	0,3819	0,3985	0,4154	0,4327	0,4504
	1,45	0,3011	0,3169	0,3328	0,3489	0,3651	0,3815	0,3981	0,4150	0,4323	0,4501
	1,50	0,3007	0,3165	0,3324	0,3485	0,3647	0,3812	0,3978	0,4147	0,4319	0,4497
0,1	1,00	0,3112	0,3275	0,3439	0,3604	0,3770	0,3937	0,4106	0,4278	0,4454	0,4636
	1,05	0,3095	0,3258	0,3423	0,3588	0,3754	0,3921	0,4091	0,4263	0,4439	0,4621
	1,10	0,3079	0,3243	0,3407	0,3572	0,3739	0,3907	0,4077	0,4249	0,4425	0,4607
	1,15	0,3064	0,3228	0,3393	0,3559	0,3725	0,3894	0,4064	0,4236	0,4413	0,4595
	1,20	0,3050	0,3215	0,3380	0,3546	0,3713	0,3881	0,4052	0,4224	0,4401	0,4583
	1,25	0,3037	0,3202	0,3368	0,3534	0,3701	0,3870	0,4041	0,4214	0,4390	0,4573
	1,30	0,3025	0,3191	0,3356	0,3523	0,3691	0,3860	0,4030	0,4203	0,4380	0,4563
	1,35	0,3014	0,3180	0,3346	0,3513	0,3681	0,3850	0,4021	0,4194	0,4371	0,4554
	1,40	0,3004	0,3170	0,3336	0,3503	0,3671	0,3841	0,4012	0,4185	0,4362	0,4545
	1,45	0,2994	0,3160	0,3327	0,3494	0,3662	0,3832	0,4003	0,4177	0,4354	0,4537
	1,50	0,2985	0,3151	0,3318	0,3486	0,3654	0,3824	0,3995	0,4169	0,4347	0,4530
0,15	1,00	0,3180	0,3349	0,3517	0,3686	0,3855	0,4025	0,4197	0,4371	0,4550	0,4737
	1,05	0,3150	0,3320	0,3489	0,3659	0,3829	0,4000	0,4173	0,4348	0,4527	0,4714
	1,10	0,3122	0,3293	0,3464	0,3634	0,3805	0,3977	0,4150	0,4326	0,4505	0,4692
	1,15	0,3096	0,3268	0,3440	0,3611	0,3783	0,3955	0,4129	0,4305	0,4485	0,4673
	1,20	0,3071	0,3245	0,3417	0,3590	0,3762	0,3935	0,4110	0,4287	0,4467	0,4654
	1,25	0,3049	0,3223	0,3397	0,3570	0,3743	0,3917	0,4092	0,4269	0,4450	0,4637
	1,30	0,3027	0,3203	0,3377	0,3551	0,3725	0,3899	0,4075	0,4253	0,4434	0,4622
	1,35	0,3006	0,3183	0,3359	0,3533	0,3708	0,3883	0,4059	0,4237	0,4419	0,4607
	1,40	0,2987	0,3165	0,3342	0,3517	0,3692	0,3868	0,4044	0,4223	0,4405	0,4593
	1,45	0,2969	0,3148	0,3325	0,3501	0,3677	0,3853	0,4030	0,4210	0,4392	0,4580
	1,50	0,2952	0,3132	0,3310	0,3487	0,3663	0,3840	0,4017	0,4197	0,4380	0,4568
0,2	1,00	0,3270	0,3443	0,3614	0,3785	0,3957	0,4129	0,4302	0,4478	0,4659	0,4821
	1,05	0,3226	0,3401	0,3574	0,3747	0,3920	0,4094	0,4268	0,4445	0,4627	0,4808
	1,10	0,3183	0,3361	0,3537	0,3712	0,3886	0,4061	0,4237	0,4415	0,4597	0,4790
	1,15	0,3142	0,3323	0,3501	0,3678	0,3854	0,4030	0,4207	0,4387	0,4570	0,4762
	1,20	0,3103	0,3287	0,3468	0,3646	0,3824	0,4002	0,4180	0,4360	0,4544	0,4737
	1,25	0,3066	0,3253	0,3436	0,3617	0,3796	0,3975	0,4154	0,4335	0,4520	0,4713
	1,30	0,3030	0,3220	0,3406	0,3588	0,3769	0,3949	0,4130	0,4312	0,4498	0,4691
	1,35	0,2995	0,3189	0,3377	0,3561	0,3744	0,3925	0,4107	0,4290	0,4476	0,4670
	1,40	0,2960	0,3159	0,3349	0,3536	0,3720	0,3902	0,4085	0,4269	0,4456	0,4650
	1,45	0,2927	0,3129	0,3323	0,3511	0,3697	0,3881	0,4065	0,4250	0,4437	0,4632
	1,50	0,2894	0,3101	0,3298	0,3488	0,3675	0,3860	0,4045	0,4231	0,4419	0,4614
0,25	1,00	0,3388	0,3561	0,3733	0,3905	0,4076	0,4247	0,4420	0,4596	0,4779	0,4872
	1,05	0,3328	0,3506	0,3681	0,3855	0,4029	0,4203	0,4378	0,4555	0,4739	0,4855
	1,10	0,3269	0,3452	0,3631	0,3809	0,3985	0,4161	0,4338	0,4517	0,4701	0,4840
	1,15	0,3211	0,3400	0,3583	0,3764	0,3942	0,4121	0,4300	0,4481	0,4666	0,4826
	1,20	0,3153	0,3348	0,3537	0,3721	0,3902	0,4083	0,4264	0,4446	0,4633	0,4812
	1,25	0,3095	0,3298	0,3491	0,3679	0,3864	0,4047	0,4230	0,4414	0,4602	0,4800
	1,30	0,3035	0,3248	0,3447	0,3639	0,3827	0,4012	0,4197	0,4383	0,4572	0,4771
	1,35	0,2972	0,3198	0,3404	0,3600	0,3791	0,3979	0,4166	0,4354	0,4544	0,4744
	1,40	0,2904	0,3147	0,3361	0,3563	0,3757	0,3947	0,4136	0,4326	0,4518	0,4717
	1,45	0,2826	0,3096	0,3319	0,3526	0,3724	0,3917	0,4108	0,4299	0,4492	0,4693
	1,50	0,2724	0,3042	0,3277	0,3490	0,3692	0,3888	0,4081	0,4274	0,4468	0,4669
0,3	1,00	0,3533	0,3704	0,3873	0,4042	0,4210	0,4379	0,4550	0,4724	0,4846	0,4927
	1,05	0,3460	0,3637	0,3811	0,3983	0,4155	0,4327	0,4500	0,4676	0,4826	0,4907
	1,10	0,3387	0,3570	0,3749	0,3926	0,4101	0,4276	0,4452	0,4631	0,4807	0,4888
	1,15	0,3312	0,3504	0,3689	0,3870	0,4049	0,4228	0,4406	0,4587	0,4774	0,4871
	1,20	0,3233	0,3436	0,3629	0,3816	0,3999	0,4181	0,4362	0,4546	0,4734	0,4855
	1,25	0,3146	0,3367	0,3569	0,3762	0,3950	0,4135	0,4320	0,4506	0,4696	0,4839
	1,30	0,3045	0,3294	0,3508	0,3709	0,3902	0,4091	0,4279	0,4467	0,4659	0,4825
	1,35	0,2899	0,3215	0,3446	0,3656	0,3855	0,4048	0,4239	0,4430	0,4624	0,4812
	1,40		0,3122	0,3382	0,3603	0,3808	0,4007	0,4201	0,4395	0,4591	0,4797
	1,45		0,2995	0,3312	0,3549	0,3762	0,3966	0,4164	0,4360	0,4559	0,4766
	1,50			0,3235	0,3493	0,3717	0,3926	0,4128	0,4327	0,4528	0,4736

μ_{lu} pour S 500 PH ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 6

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1224	0,1305	0,1389	0,1474	0,1562	0,1652	0,1744	0,1838	0,1935	0,2033
0,05	1,00	0,1391	0,1490	0,1590	0,1691	0,1794	0,1899	0,2005	0,2113	0,2223	0,2335
	1,05	0,1362	0,1461	0,1561	0,1662	0,1765	0,1869	0,1976	0,2084	0,2193	0,2305
	1,10	0,1334	0,1433	0,1533	0,1635	0,1738	0,1842	0,1949	0,2056	0,2166	0,2278
	1,15	0,1309	0,1408	0,1508	0,1610	0,1713	0,1817	0,1924	0,2031	0,2141	0,2253
	1,20	0,1284	0,1384	0,1485	0,1587	0,1690	0,1794	0,1900	0,2008	0,2118	0,2229
	1,25	0,1262	0,1362	0,1463	0,1565	0,1668	0,1773	0,1879	0,1987	0,2096	0,2208
	1,30	0,1240	0,1341	0,1442	0,1545	0,1648	0,1753	0,1859	0,1967	0,2076	0,2187
	1,35	0,1220	0,1321	0,1423	0,1526	0,1629	0,1734	0,1840	0,1948	0,2057	0,2169
	1,40	0,1200	0,1303	0,1405	0,1508	0,1611	0,1716	0,1823	0,1930	0,2040	0,2151
	1,45	0,1182	0,1285	0,1388	0,1491	0,1595	0,1700	0,1806	0,1914	0,2023	0,2135
	1,50	0,1164	0,1268	0,1371	0,1475	0,1579	0,1684	0,1791	0,1898	0,2008	0,2119
0,1	1,00	0,1692	0,1801	0,1913	0,2025	0,2138	0,2253	0,2370	0,2489	0,2609	0,2731
	1,05	0,1626	0,1738	0,1850	0,1962	0,2076	0,2192	0,2309	0,2427	0,2547	0,2669
	1,10	0,1563	0,1676	0,1789	0,1903	0,2018	0,2134	0,2251	0,2370	0,2490	0,2612
	1,15	0,1500	0,1616	0,1731	0,1847	0,1962	0,2079	0,2196	0,2315	0,2436	0,2558
	1,20	0,1436	0,1556	0,1675	0,1792	0,1909	0,2027	0,2145	0,2264	0,2385	0,2507
	1,25	0,1369	0,1497	0,1619	0,1739	0,1858	0,1976	0,2096	0,2216	0,2337	0,2460
	1,30	0,1295	0,1435	0,1564	0,1687	0,1808	0,1928	0,2049	0,2170	0,2292	0,2415
	1,35	0,1202	0,1370	0,1507	0,1635	0,1760	0,1882	0,2004	0,2126	0,2248	0,2372
	1,40	0,0842	0,1294	0,1448	0,1584	0,1712	0,1837	0,1960	0,2084	0,2207	0,2331
	1,45		0,1181	0,1385	0,1531	0,1665	0,1793	0,1918	0,2043	0,2167	0,2292
	1,50			0,1309	0,1476	0,1617	0,1749	0,1877	0,2004	0,2129	0,2255
0,15	1,00	0,2079	0,2195	0,2312	0,2431	0,2551	0,2673	0,2796	0,2921	0,3049	0,3178
	1,05	0,1991	0,2107	0,2225	0,2344	0,2464	0,2586	0,2709	0,2835	0,2962	0,3090
	1,10	0,1905	0,2022	0,2141	0,2260	0,2381	0,2503	0,2627	0,2752	0,2879	0,3008
	1,15	0,1818	0,1938	0,2058	0,2179	0,2301	0,2424	0,2548	0,2674	0,2801	0,2930
	1,20	0,1728	0,1853	0,1976	0,2100	0,2223	0,2347	0,2472	0,2598	0,2726	0,2855
	1,25	0,1632	0,1765	0,1894	0,2020	0,2146	0,2272	0,2398	0,2526	0,2654	0,2784
	1,30	0,1519	0,1670	0,1808	0,1940	0,2070	0,2198	0,2327	0,2455	0,2585	0,2716
	1,35	0,1378	0,1557	0,1715	0,1857	0,1993	0,2125	0,2256	0,2387	0,2518	0,2650
	1,40	0,1335	0,1381	0,1605	0,1768	0,1913	0,2051	0,2186	0,2320	0,2453	0,2586
	1,45	0,1284	0,1336	0,1385	0,1663	0,1828	0,1975	0,2116	0,2253	0,2388	0,2524
	1,50	0,1188	0,1278	0,1337	0,1490	0,1730	0,1895	0,2044	0,2186	0,2325	0,2463
0,2	1,00	0,2483	0,2604	0,2727	0,2851	0,2977	0,3105	0,3234	0,3365	0,3499	0,3634
	1,05	0,2383	0,2503	0,2626	0,2749	0,2875	0,3002	0,3131	0,3261	0,3394	0,3528
	1,10	0,2285	0,2405	0,2527	0,2651	0,2776	0,2903	0,3031	0,3162	0,3294	0,3428
	1,15	0,2187	0,2309	0,2432	0,2555	0,2681	0,2808	0,2936	0,3066	0,3198	0,3332
	1,20	0,2090	0,2213	0,2337	0,2462	0,2588	0,2715	0,2844	0,2974	0,3106	0,3240
	1,25	0,1989	0,2115	0,2242	0,2368	0,2496	0,2624	0,2754	0,2885	0,3017	0,3152
	1,30	0,1881	0,2014	0,2145	0,2275	0,2404	0,2535	0,2666	0,2798	0,2931	0,3066
	1,35	0,1786	0,1903	0,2043	0,2178	0,2312	0,2445	0,2578	0,2712	0,2847	0,2983
	1,40	0,1746	0,1792	0,1929	0,2076	0,2216	0,2354	0,2491	0,2627	0,2764	0,2901
	1,45	0,1704	0,1750	0,1797	0,1961	0,2114	0,2260	0,2402	0,2542	0,2681	0,2821
	1,50	0,1659	0,1707	0,1754	0,1809	0,1999	0,2159	0,2310	0,2455	0,2598	0,2741
0,25	1,00	0,2868	0,2996	0,3124	0,3255	0,3386	0,3520	0,3655	0,3792	0,3930	0,4072
	1,05	0,2761	0,2887	0,3015	0,3144	0,3275	0,3407	0,3541	0,3677	0,3815	0,3955
	1,10	0,2657	0,2782	0,2909	0,3037	0,3167	0,3298	0,3432	0,3567	0,3704	0,3843
	1,15	0,2555	0,2680	0,2806	0,2934	0,3063	0,3194	0,3326	0,3460	0,3597	0,3735
	1,20	0,2454	0,2578	0,2704	0,2832	0,2961	0,3092	0,3224	0,3358	0,3494	0,3632
	1,25	0,2352	0,2477	0,2604	0,2732	0,2861	0,2992	0,3124	0,3258	0,3394	0,3532
	1,30	0,2247	0,2375	0,2503	0,2632	0,2762	0,2893	0,3026	0,3161	0,3297	0,3435
	1,35	0,2169	0,2269	0,2400	0,2531	0,2663	0,2796	0,2930	0,3065	0,3202	0,3340
	1,40	0,2127	0,2176	0,2292	0,2427	0,2562	0,2697	0,2833	0,2970	0,3108	0,3247
	1,45	0,2085	0,2134	0,2183	0,2318	0,2458	0,2597	0,2736	0,2875	0,3014	0,3155
	1,50	0,2043	0,2092	0,2141	0,2196	0,2346	0,2492	0,2636	0,2778	0,2921	0,3064
0,3	1,00	0,3222	0,3356	0,3491	0,3627	0,3764	0,3903	0,4043	0,4185	0,4329	0,4476
	1,05	0,3112	0,3244	0,3378	0,3512	0,3648	0,3785	0,3924	0,4065	0,4208	0,4354
	1,10	0,3006	0,3136	0,3268	0,3401	0,3536	0,3672	0,3810	0,3950	0,4091	0,4236
	1,15	0,2901	0,3031	0,3161	0,3293	0,3427	0,3562	0,3699	0,3838	0,3978	0,4122
	1,20	0,2798	0,2927	0,3057	0,3188	0,3321	0,3455	0,3591	0,3729	0,3869	0,4012
	1,25	0,2696	0,2824	0,2953	0,3084	0,3217	0,3350	0,3486	0,3623	0,3763	0,3905
	1,30	0,2594	0,2722	0,2851	0,2982	0,3114	0,3248	0,3383	0,3520	0,3659	0,3801
	1,35	0,2525	0,2618	0,2748	0,2879	0,3012	0,3146	0,3281	0,3419	0,3558	0,3699
	1,40	0,2481	0,2534	0,2643	0,2776	0,2909	0,3044	0,3180	0,3318	0,3458	0,3599
	1,45	0,2439	0,2491	0,2544	0,2670	0,2806	0,2942	0,3079	0,3218	0,3359	0,3501
	1,50	0,2397	0,2449	0,2501	0,2559	0,2698	0,2838	0,2977	0,3118	0,3260	0,3403

μ_{lu} pour S 500 PH ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 9

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1607	0,1709	0,1813	0,1920	0,2029	0,2140	0,2254	0,2370	0,2488	0,2610
0,05	1,00	0,1734	0,1851	0,1969	0,2088	0,2210	0,2334	0,2459	0,2587	0,2717	0,2849
	1,05	0,1711	0,1827	0,1945	0,2065	0,2187	0,2310	0,2436	0,2563	0,2693	0,2825
	1,10	0,1689	0,1806	0,1924	0,2044	0,2165	0,2289	0,2414	0,2542	0,2671	0,2803
	1,15	0,1670	0,1786	0,1904	0,2024	0,2146	0,2269	0,2395	0,2522	0,2652	0,2783
	1,20	0,1651	0,1768	0,1886	0,2006	0,2128	0,2251	0,2376	0,2504	0,2633	0,2765
	1,25	0,1634	0,1751	0,1869	0,1989	0,2111	0,2234	0,2359	0,2487	0,2616	0,2748
	1,30	0,1618	0,1735	0,1853	0,1973	0,2095	0,2218	0,2344	0,2471	0,2601	0,2732
	1,35	0,1603	0,1720	0,1839	0,1959	0,2080	0,2204	0,2329	0,2456	0,2586	0,2717
	1,40	0,1589	0,1706	0,1825	0,1945	0,2067	0,2190	0,2316	0,2443	0,2572	0,2704
	1,45	0,1575	0,1693	0,1812	0,1932	0,2054	0,2178	0,2303	0,2430	0,2559	0,2691
	1,50	0,1563	0,1681	0,1800	0,1920	0,2042	0,2166	0,2291	0,2418	0,2547	0,2679
0,1	1,00	0,1946	0,2074	0,2204	0,2334	0,2466	0,2599	0,2734	0,2871	0,3010	0,3151
	1,05	0,1891	0,2021	0,2151	0,2283	0,2415	0,2549	0,2684	0,2821	0,2960	0,3101
	1,10	0,1838	0,1970	0,2102	0,2234	0,2367	0,2501	0,2637	0,2774	0,2913	0,3055
	1,15	0,1788	0,1922	0,2055	0,2188	0,2322	0,2457	0,2593	0,2731	0,2870	0,3012
	1,20	0,1738	0,1875	0,2010	0,2145	0,2280	0,2415	0,2552	0,2690	0,2830	0,2972
	1,25	0,1690	0,1830	0,1967	0,2104	0,2240	0,2376	0,2514	0,2652	0,2792	0,2934
	1,30	0,1642	0,1786	0,1926	0,2064	0,2202	0,2339	0,2477	0,2616	0,2757	0,2899
	1,35	0,1593	0,1743	0,1887	0,2027	0,2165	0,2304	0,2443	0,2582	0,2723	0,2866
	1,40	0,1543	0,1701	0,1848	0,1990	0,2131	0,2270	0,2410	0,2550	0,2692	0,2835
	1,45	0,1490	0,1658	0,1810	0,1955	0,2097	0,2238	0,2379	0,2520	0,2662	0,2805
	1,50	0,1432	0,1615	0,1773	0,1921	0,2066	0,2208	0,2349	0,2491	0,2634	0,2777
0,15	1,00	0,2243	0,2377	0,2512	0,2648	0,2786	0,2925	0,3065	0,3208	0,3352	0,3499
	1,05	0,2160	0,2297	0,2434	0,2571	0,2710	0,2849	0,2991	0,3134	0,3278	0,3426
	1,10	0,2079	0,2219	0,2358	0,2497	0,2637	0,2778	0,2920	0,3064	0,3209	0,3356
	1,15	0,1997	0,2141	0,2284	0,2425	0,2567	0,2709	0,2853	0,2997	0,3143	0,3291
	1,20	0,1913	0,2064	0,2211	0,2356	0,2500	0,2644	0,2788	0,2934	0,3081	0,3230
	1,25	0,1822	0,1985	0,2138	0,2287	0,2434	0,2581	0,2727	0,2874	0,3022	0,3171
	1,30	0,1715	0,1900	0,2064	0,2219	0,2370	0,2519	0,2667	0,2816	0,2965	0,3116
	1,35	0,1516	0,1806	0,1987	0,2151	0,2307	0,2459	0,2610	0,2760	0,2911	0,3063
	1,40	0,1267	0,1679	0,1903	0,2080	0,2243	0,2400	0,2554	0,2707	0,2859	0,3012
	1,45		0,1235	0,1804	0,2006	0,2179	0,2342	0,2499	0,2654	0,2809	0,2963
	1,50			0,1630	0,1924	0,2113	0,2283	0,2445	0,2604	0,2760	0,2916
0,2	1,00	0,2584	0,2720	0,2858	0,2997	0,3138	0,3280	0,3424	0,3570	0,3718	0,3869
	1,05	0,2486	0,2624	0,2763	0,2903	0,3044	0,3187	0,3331	0,3478	0,3626	0,3777
	1,10	0,2388	0,2529	0,2669	0,2811	0,2953	0,3097	0,3242	0,3390	0,3539	0,3690
	1,15	0,2289	0,2434	0,2577	0,2721	0,2865	0,3011	0,3157	0,3305	0,3455	0,3607
	1,20	0,2187	0,2337	0,2485	0,2632	0,2779	0,2926	0,3074	0,3224	0,3375	0,3528
	1,25	0,2074	0,2236	0,2391	0,2543	0,2694	0,2844	0,2994	0,3145	0,3297	0,3451
	1,30	0,1939	0,2126	0,2293	0,2453	0,2609	0,2762	0,2915	0,3069	0,3223	0,3378
	1,35	0,1783	0,1992	0,2187	0,2359	0,2522	0,2681	0,2838	0,2994	0,3150	0,3307
	1,40	0,1728	0,1789	0,2058	0,2256	0,2432	0,2598	0,2760	0,2920	0,3079	0,3238
	1,45	0,1657	0,1730	0,1796	0,2136	0,2336	0,2513	0,2682	0,2846	0,3008	0,3170
	1,50		0,1645	0,1732	0,1942	0,2226	0,2423	0,2602	0,2773	0,2939	0,3104
0,25	1,00	0,2930	0,3068	0,3208	0,3349	0,3492	0,3637	0,3783	0,3932	0,4083	0,4237
	1,05	0,2824	0,2963	0,3103	0,3245	0,3388	0,3533	0,3679	0,3828	0,3979	0,4133
	1,10	0,2719	0,2859	0,3001	0,3143	0,3287	0,3432	0,3579	0,3728	0,3880	0,4034
	1,15	0,2614	0,2756	0,2899	0,3043	0,3188	0,3334	0,3482	0,3632	0,3784	0,3938
	1,20	0,2507	0,2652	0,2798	0,2944	0,3090	0,3238	0,3387	0,3538	0,3691	0,3846
	1,25	0,2393	0,2545	0,2695	0,2844	0,2994	0,3144	0,3295	0,3447	0,3601	0,3757
	1,30	0,2268	0,2431	0,2588	0,2743	0,2896	0,3050	0,3203	0,3357	0,3513	0,3671
	1,35	0,2166	0,2302	0,2474	0,2638	0,2797	0,2955	0,3112	0,3269	0,3427	0,3586
	1,40	0,2117	0,2174	0,2343	0,2524	0,2694	0,2858	0,3020	0,3181	0,3341	0,3503
	1,45	0,2064	0,2123	0,2182	0,2393	0,2582	0,2757	0,2926	0,3092	0,3256	0,3421
	1,50	0,2005	0,2068	0,2130	0,2206	0,2453	0,2649	0,2829	0,3002	0,3171	0,3339
0,3	1,00	0,3258	0,3399	0,3541	0,3685	0,3830	0,3977	0,4125	0,4276	0,4430	0,4587
	1,05	0,3150	0,3290	0,3432	0,3576	0,3721	0,3867	0,4016	0,4167	0,4320	0,4477
	1,10	0,3043	0,3184	0,3326	0,3469	0,3614	0,3761	0,3910	0,4061	0,4214	0,4371
	1,15	0,2936	0,3078	0,3221	0,3365	0,3510	0,3657	0,3806	0,3957	0,4111	0,4268
	1,20	0,2829	0,2972	0,3116	0,3261	0,3407	0,3555	0,3705	0,3857	0,4011	0,4168
	1,25	0,2718	0,2864	0,3010	0,3157	0,3305	0,3455	0,3606	0,3758	0,3913	0,4071
	1,30	0,2602	0,2753	0,2903	0,3053	0,3203	0,3354	0,3507	0,3661	0,3817	0,3976
	1,35	0,2522	0,2634	0,2790	0,2945	0,3099	0,3254	0,3409	0,3565	0,3722	0,3882
	1,40	0,2474	0,2533	0,2669	0,2832	0,2992	0,3151	0,3310	0,3469	0,3629	0,3790
	1,45	0,2425	0,2484	0,2543	0,2709	0,2879	0,3045	0,3209	0,3372	0,3535	0,3699
	1,50	0,2374	0,2434	0,2494	0,2563	0,2754	0,2932	0,3104	0,3273	0,3440	0,3608

μ_{lu} pour S 500 PH ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 12

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1903	0,2019	0,2138	0,2258	0,2381	0,2507	0,2635	0,2766	0,2899	0,3035
0,05	1,00	0,2007	0,2135	0,2265	0,2397	0,2531	0,2667	0,2805	0,2945	0,3088	0,3233
	1,05	0,1988	0,2116	0,2246	0,2378	0,2512	0,2647	0,2785	0,2926	0,3068	0,3213
	1,10	0,1970	0,2098	0,2228	0,2360	0,2494	0,2630	0,2768	0,2908	0,3050	0,3196
	1,15	0,1954	0,2082	0,2212	0,2344	0,2478	0,2614	0,2751	0,2892	0,3034	0,3179
	1,20	0,1938	0,2067	0,2197	0,2329	0,2463	0,2599	0,2736	0,2877	0,3019	0,3164
	1,25	0,1924	0,2053	0,2183	0,2315	0,2449	0,2585	0,2723	0,2863	0,3005	0,3150
	1,30	0,1911	0,2040	0,2170	0,2302	0,2436	0,2572	0,2710	0,2850	0,2992	0,3137
	1,35	0,1899	0,2028	0,2158	0,2290	0,2424	0,2560	0,2698	0,2838	0,2980	0,3125
	1,40	0,1888	0,2017	0,2147	0,2279	0,2413	0,2549	0,2687	0,2827	0,2969	0,3114
	1,45	0,1877	0,2006	0,2137	0,2269	0,2403	0,2538	0,2676	0,2816	0,2959	0,3104
	1,50	0,1867	0,1996	0,2127	0,2259	0,2393	0,2529	0,2667	0,2807	0,2949	0,3094
0,1	1,00	0,2169	0,2309	0,2449	0,2591	0,2734	0,2879	0,3025	0,3173	0,3324	0,3476
	1,05	0,2123	0,2264	0,2405	0,2548	0,2691	0,2836	0,2983	0,3132	0,3282	0,3435
	1,10	0,2079	0,2222	0,2364	0,2507	0,2652	0,2797	0,2944	0,3093	0,3244	0,3397
	1,15	0,2038	0,2182	0,2326	0,2470	0,2615	0,2761	0,2908	0,3057	0,3209	0,3362
	1,20	0,1999	0,2145	0,2290	0,2435	0,2580	0,2727	0,2875	0,3024	0,3176	0,3329
	1,25	0,1962	0,2109	0,2255	0,2401	0,2548	0,2695	0,2843	0,2993	0,3145	0,3299
	1,30	0,1926	0,2075	0,2223	0,2370	0,2517	0,2665	0,2814	0,2964	0,3116	0,3270
	1,35	0,1891	0,2043	0,2192	0,2340	0,2488	0,2637	0,2786	0,2937	0,3089	0,3243
	1,40	0,1857	0,2012	0,2163	0,2312	0,2461	0,2610	0,2760	0,2911	0,3064	0,3218
	1,45	0,1825	0,1982	0,2135	0,2285	0,2435	0,2585	0,2735	0,2887	0,3040	0,3195
	1,50	0,1792	0,1953	0,2108	0,2260	0,2411	0,2561	0,2712	0,2864	0,3017	0,3172
0,15	1,00	0,2400	0,2546	0,2693	0,2841	0,2990	0,3140	0,3291	0,3445	0,3600	0,3758
	1,05	0,2326	0,2476	0,2625	0,2774	0,2924	0,3075	0,3227	0,3382	0,3538	0,3696
	1,10	0,2255	0,2407	0,2559	0,2710	0,2861	0,3014	0,3167	0,3322	0,3479	0,3638
	1,15	0,2183	0,2340	0,2495	0,2649	0,2802	0,2956	0,3110	0,3266	0,3424	0,3584
	1,20	0,2112	0,2275	0,2433	0,2590	0,2745	0,2901	0,3057	0,3214	0,3372	0,3533
	1,25	0,2038	0,2209	0,2373	0,2533	0,2691	0,2848	0,3006	0,3164	0,3323	0,3484
	1,30	0,1959	0,2143	0,2313	0,2477	0,2638	0,2798	0,2957	0,3116	0,3277	0,3439
	1,35	0,1869	0,2074	0,2254	0,2423	0,2587	0,2749	0,2910	0,3071	0,3233	0,3396
	1,40	0,1746	0,2001	0,2193	0,2369	0,2538	0,2702	0,2865	0,3028	0,3191	0,3354
	1,45		0,1917	0,2131	0,2316	0,2489	0,2657	0,2822	0,2986	0,3150	0,3315
	1,50		0,1805	0,2065	0,2262	0,2441	0,2613	0,2780	0,2946	0,3112	0,3278
0,2	1,00	0,2685	0,2833	0,2981	0,3131	0,3282	0,3434	0,3588	0,3744	0,3903	0,4064
	1,05	0,2592	0,2743	0,2894	0,3045	0,3198	0,3351	0,3507	0,3664	0,3823	0,3985
	1,10	0,2499	0,2654	0,2808	0,2962	0,3117	0,3272	0,3429	0,3587	0,3747	0,3910
	1,15	0,2405	0,2566	0,2724	0,2881	0,3038	0,3196	0,3354	0,3513	0,3675	0,3839
	1,20	0,2306	0,2476	0,2640	0,2801	0,2962	0,3122	0,3282	0,3443	0,3606	0,3771
	1,25	0,2196	0,2382	0,2555	0,2722	0,2887	0,3050	0,3212	0,3376	0,3540	0,3706
	1,30	0,2060	0,2279	0,2467	0,2642	0,2812	0,2979	0,3145	0,3310	0,3476	0,3644
	1,35	0,1778	0,2157	0,2372	0,2560	0,2737	0,2909	0,3079	0,3247	0,3415	0,3584
	1,40	0,1681	0,1785	0,2265	0,2474	0,2662	0,2840	0,3014	0,3185	0,3356	0,3527
	1,45		0,1664	0,2118	0,2380	0,2583	0,2770	0,2949	0,3125	0,3298	0,3471
	1,50			0,1640	0,2267	0,2500	0,2699	0,2885	0,3065	0,3242	0,3418
0,25	1,00	0,2991	0,3139	0,3287	0,3437	0,3589	0,3742	0,3896	0,4053	0,4213	0,4377
	1,05	0,2888	0,3038	0,3189	0,3340	0,3493	0,3647	0,3803	0,3961	0,4121	0,4285
	1,10	0,2786	0,2938	0,3091	0,3245	0,3399	0,3555	0,3712	0,3871	0,4033	0,4198
	1,15	0,2681	0,2838	0,2995	0,3151	0,3308	0,3466	0,3625	0,3785	0,3948	0,4114
	1,20	0,2571	0,2735	0,2897	0,3058	0,3218	0,3378	0,3539	0,3702	0,3866	0,4033
	1,25	0,2450	0,2627	0,2797	0,2964	0,3128	0,3292	0,3456	0,3620	0,3787	0,3955
	1,30	0,2304	0,2508	0,2692	0,2867	0,3038	0,3206	0,3373	0,3541	0,3709	0,3879
	1,35	0,2162	0,2363	0,2577	0,2766	0,2945	0,3120	0,3291	0,3462	0,3634	0,3806
	1,40	0,2101	0,2171	0,2436	0,2655	0,2849	0,3032	0,3210	0,3385	0,3559	0,3734
	1,45	0,2021	0,2106	0,2181	0,2524	0,2745	0,2941	0,3127	0,3307	0,3486	0,3664
	1,50		0,2010	0,2110	0,2302	0,2625	0,2844	0,3041	0,3230	0,3413	0,3595
0,3	1,00	0,3293	0,3440	0,3589	0,3739	0,3890	0,4043	0,4198	0,4355	0,4516	0,4682
	1,05	0,3187	0,3336	0,3485	0,3636	0,3788	0,3942	0,4098	0,4256	0,4417	0,4583
	1,10	0,3081	0,3232	0,3383	0,3535	0,3688	0,3843	0,4000	0,4159	0,4321	0,4488
	1,15	0,2974	0,3127	0,3281	0,3435	0,3590	0,3747	0,3905	0,4065	0,4228	0,4395
	1,20	0,2863	0,3021	0,3178	0,3335	0,3493	0,3652	0,3812	0,3974	0,4138	0,4306
	1,25	0,2746	0,2910	0,3073	0,3234	0,3395	0,3557	0,3720	0,3884	0,4050	0,4219
	1,30	0,2614	0,2792	0,2963	0,3131	0,3297	0,3462	0,3628	0,3795	0,3963	0,4134
	1,35	0,2520	0,2657	0,2845	0,3023	0,3196	0,3367	0,3537	0,3707	0,3878	0,4051
	1,40	0,2465	0,2531	0,2708	0,2905	0,3090	0,3269	0,3444	0,3618	0,3793	0,3969
	1,45	0,2406	0,2475	0,2542	0,2769	0,2975	0,3166	0,3349	0,3529	0,3708	0,3887
	1,50	0,2337	0,2412	0,2484	0,2574	0,2842	0,3055	0,3250	0,3438	0,3623	0,3806

μ_{lu} pour S 500 PH ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 15

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2139	0,2265	0,2393	0,2523	0,2656	0,2791	0,2929	0,3070	0,3213	0,3359
0,05	1,00	0,2226	0,2363	0,2501	0,2641	0,2783	0,2927	0,3074	0,3222	0,3374	0,3528
	1,05	0,2210	0,2346	0,2485	0,2625	0,2767	0,2911	0,3057	0,3206	0,3357	0,3511
	1,10	0,2195	0,2331	0,2469	0,2610	0,2752	0,2896	0,3042	0,3191	0,3342	0,3496
	1,15	0,2181	0,2317	0,2456	0,2596	0,2738	0,2882	0,3029	0,3177	0,3328	0,3482
	1,20	0,2168	0,2304	0,2443	0,2583	0,2725	0,2870	0,3016	0,3165	0,3316	0,3470
	1,25	0,2156	0,2293	0,2431	0,2571	0,2714	0,2858	0,3004	0,3153	0,3304	0,3458
	1,30	0,2145	0,2282	0,2420	0,2560	0,2703	0,2847	0,2993	0,3142	0,3293	0,3447
	1,35	0,2134	0,2271	0,2410	0,2550	0,2693	0,2837	0,2983	0,3132	0,3283	0,3437
	1,40	0,2125	0,2262	0,2401	0,2541	0,2683	0,2827	0,2974	0,3122	0,3274	0,3428
	1,45	0,2116	0,2253	0,2392	0,2532	0,2674	0,2819	0,2965	0,3114	0,3265	0,3419
	1,50	0,2108	0,2245	0,2383	0,2524	0,2666	0,2810	0,2957	0,3105	0,3257	0,3411
0,1	1,00	0,2356	0,2504	0,2652	0,2801	0,2951	0,3103	0,3257	0,3413	0,3571	0,3732
	1,05	0,2317	0,2466	0,2614	0,2764	0,2915	0,3067	0,3221	0,3377	0,3536	0,3697
	1,10	0,2281	0,2430	0,2579	0,2730	0,2881	0,3034	0,3188	0,3345	0,3503	0,3665
	1,15	0,2246	0,2397	0,2547	0,2698	0,2850	0,3003	0,3158	0,3315	0,3474	0,3635
	1,20	0,2214	0,2366	0,2517	0,2668	0,2821	0,2975	0,3130	0,3287	0,3446	0,3607
	1,25	0,2184	0,2336	0,2488	0,2641	0,2794	0,2948	0,3103	0,3261	0,3420	0,3582
	1,30	0,2155	0,2309	0,2462	0,2615	0,2768	0,2923	0,3079	0,3236	0,3396	0,3558
	1,35	0,2127	0,2282	0,2436	0,2590	0,2744	0,2900	0,3056	0,3214	0,3374	0,3536
	1,40	0,2101	0,2258	0,2413	0,2567	0,2722	0,2878	0,3034	0,3192	0,3352	0,3515
	1,45	0,2076	0,2234	0,2390	0,2545	0,2701	0,2857	0,3014	0,3172	0,3333	0,3495
	1,50	0,2052	0,2211	0,2369	0,2525	0,2681	0,2837	0,2995	0,3153	0,3314	0,3477
0,15	1,00	0,2542	0,2697	0,2851	0,3006	0,3162	0,3319	0,3478	0,3638	0,3801	0,3967
	1,05	0,2478	0,2635	0,2791	0,2948	0,3105	0,3263	0,3423	0,3584	0,3748	0,3914
	1,10	0,2415	0,2575	0,2734	0,2892	0,3051	0,3211	0,3371	0,3533	0,3698	0,3864
	1,15	0,2354	0,2518	0,2680	0,2840	0,3000	0,3161	0,3323	0,3486	0,3651	0,3818
	1,20	0,2294	0,2463	0,2627	0,2790	0,2952	0,3114	0,3277	0,3441	0,3607	0,3775
	1,25	0,2234	0,2408	0,2577	0,2742	0,2906	0,3070	0,3234	0,3399	0,3566	0,3734
	1,30	0,2174	0,2355	0,2528	0,2696	0,2862	0,3028	0,3193	0,3359	0,3527	0,3696
	1,35	0,2112	0,2302	0,2480	0,2652	0,2820	0,2988	0,3154	0,3322	0,3490	0,3660
	1,40	0,2045	0,2249	0,2433	0,2609	0,2780	0,2949	0,3117	0,3286	0,3455	0,3626
	1,45	0,1972	0,2195	0,2387	0,2567	0,2741	0,2912	0,3082	0,3252	0,3422	0,3594
	1,50	0,1878	0,2139	0,2341	0,2526	0,2704	0,2877	0,3048	0,3219	0,3390	0,3563
0,2	1,00	0,2780	0,2937	0,3093	0,3250	0,3408	0,3567	0,3728	0,3891	0,4056	0,4225
	1,05	0,2695	0,2855	0,3014	0,3173	0,3333	0,3494	0,3656	0,3820	0,3987	0,4156
	1,10	0,2609	0,2774	0,2937	0,3099	0,3261	0,3424	0,3588	0,3753	0,3921	0,4091
	1,15	0,2523	0,2694	0,2862	0,3027	0,3192	0,3357	0,3523	0,3689	0,3858	0,4030
	1,20	0,2433	0,2613	0,2787	0,2957	0,3125	0,3292	0,3460	0,3629	0,3799	0,3971
	1,25	0,2336	0,2531	0,2712	0,2888	0,3060	0,3230	0,3400	0,3571	0,3742	0,3916
	1,30	0,2222	0,2443	0,2637	0,2819	0,2996	0,3170	0,3342	0,3515	0,3688	0,3863
	1,35	0,2041	0,2346	0,2558	0,2750	0,2933	0,3111	0,3286	0,3461	0,3636	0,3813
	1,40		0,2225	0,2475	0,2680	0,2870	0,3053	0,3232	0,3409	0,3587	0,3765
	1,45			0,2380	0,2607	0,2807	0,2996	0,3179	0,3359	0,3539	0,3718
	1,50			0,2259	0,2530	0,2743	0,2939	0,3127	0,3310	0,3492	0,3674
0,25	1,00	0,3050	0,3205	0,3361	0,3517	0,3675	0,3834	0,3994	0,4157	0,4324	0,4494
	1,05	0,2952	0,3110	0,3269	0,3427	0,3587	0,3748	0,3910	0,4074	0,4242	0,4413
	1,10	0,2854	0,3016	0,3178	0,3340	0,3502	0,3665	0,3829	0,3995	0,4164	0,4336
	1,15	0,2752	0,2921	0,3088	0,3253	0,3418	0,3584	0,3750	0,3918	0,4089	0,4262
	1,20	0,2644	0,2823	0,2997	0,3167	0,3337	0,3505	0,3674	0,3844	0,4016	0,4191
	1,25	0,2523	0,2720	0,2904	0,3081	0,3255	0,3428	0,3600	0,3773	0,3947	0,4123
	1,30	0,2366	0,2605	0,2806	0,2993	0,3174	0,3351	0,3527	0,3703	0,3879	0,4058
	1,35	0,2157	0,2461	0,2698	0,2901	0,3091	0,3275	0,3455	0,3634	0,3814	0,3994
	1,40	0,2070	0,2167	0,2570	0,2803	0,3006	0,3198	0,3384	0,3567	0,3750	0,3933
	1,45		0,2066	0,2337	0,2690	0,2917	0,3120	0,3313	0,3501	0,3687	0,3873
	1,50			0,2058	0,2539	0,2818	0,3039	0,3241	0,3435	0,3625	0,3814
0,3	1,00	0,3327	0,3480	0,3633	0,3788	0,3944	0,4102	0,4261	0,4423	0,4589	0,4763
	1,05	0,3224	0,3379	0,3535	0,3692	0,3849	0,4009	0,4170	0,4333	0,4500	0,4673
	1,10	0,3121	0,3279	0,3438	0,3597	0,3757	0,3918	0,4081	0,4246	0,4414	0,4588
	1,15	0,3014	0,3177	0,3340	0,3502	0,3665	0,3829	0,3994	0,4161	0,4331	0,4505
	1,20	0,2902	0,3073	0,3241	0,3408	0,3574	0,3741	0,3908	0,4078	0,4250	0,4425
	1,25	0,2779	0,2962	0,3139	0,3312	0,3483	0,3654	0,3824	0,3996	0,4170	0,4348
	1,30	0,2631	0,2840	0,3031	0,3213	0,3391	0,3566	0,3741	0,3916	0,4093	0,4272
	1,35	0,2516	0,2691	0,2911	0,3108	0,3296	0,3478	0,3658	0,3837	0,4017	0,4199
	1,40	0,2452	0,2528	0,2766	0,2994	0,3196	0,3388	0,3574	0,3758	0,3942	0,4126
	1,45	0,2373	0,2461	0,2541	0,2856	0,3087	0,3293	0,3488	0,3679	0,3867	0,4055
	1,50	0,2090	0,2369	0,2469	0,2622	0,2961	0,3192	0,3400	0,3598	0,3792	0,3985

μ_{lu} pour S 500 PH ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 18

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2330	0,2463	0,2598	0,2735	0,2875	0,3017	0,3162	0,3310	0,3460	0,3613
0,05	1,00	0,2405	0,2548	0,2692	0,2838	0,2986	0,3136	0,3288	0,3442	0,3600	0,3760
	1,05	0,2391	0,2533	0,2677	0,2823	0,2971	0,3121	0,3273	0,3428	0,3585	0,3746
	1,10	0,2378	0,2520	0,2664	0,2810	0,2958	0,3108	0,3260	0,3415	0,3572	0,3733
	1,15	0,2365	0,2508	0,2652	0,2798	0,2946	0,3096	0,3249	0,3403	0,3560	0,3721
	1,20	0,2354	0,2497	0,2641	0,2787	0,2935	0,3085	0,3238	0,3392	0,3550	0,3710
	1,25	0,2344	0,2487	0,2631	0,2777	0,2925	0,3075	0,3228	0,3382	0,3539	0,3700
	1,30	0,2334	0,2477	0,2622	0,2768	0,2916	0,3066	0,3218	0,3373	0,3530	0,3690
	1,35	0,2326	0,2468	0,2613	0,2759	0,2907	0,3057	0,3209	0,3364	0,3521	0,3682
	1,40	0,2317	0,2460	0,2605	0,2751	0,2899	0,3049	0,3201	0,3356	0,3513	0,3674
	1,45	0,2309	0,2452	0,2597	0,2743	0,2891	0,3041	0,3194	0,3348	0,3506	0,3666
	1,50	0,2302	0,2445	0,2590	0,2736	0,2884	0,3034	0,3187	0,3341	0,3499	0,3659
0,1	1,00	0,2514	0,2666	0,2819	0,2973	0,3128	0,3285	0,3444	0,3605	0,3768	0,3934
	1,05	0,2480	0,2633	0,2787	0,2941	0,3097	0,3254	0,3413	0,3574	0,3738	0,3905
	1,10	0,2449	0,2602	0,2757	0,2912	0,3068	0,3226	0,3385	0,3546	0,3710	0,3877
	1,15	0,2419	0,2574	0,2729	0,2884	0,3041	0,3199	0,3359	0,3520	0,3685	0,3852
	1,20	0,2392	0,2547	0,2703	0,2859	0,3016	0,3174	0,3335	0,3496	0,3661	0,3828
	1,25	0,2366	0,2522	0,2678	0,2835	0,2993	0,3152	0,3312	0,3474	0,3639	0,3806
	1,30	0,2342	0,2499	0,2656	0,2813	0,2971	0,3130	0,3291	0,3453	0,3618	0,3786
	1,35	0,2319	0,2477	0,2634	0,2792	0,2951	0,3110	0,3271	0,3434	0,3599	0,3767
	1,40	0,2297	0,2456	0,2614	0,2773	0,2932	0,3092	0,3253	0,3416	0,3581	0,3749
	1,45	0,2276	0,2436	0,2595	0,2754	0,2914	0,3074	0,3236	0,3399	0,3564	0,3732
	1,50	0,2257	0,2418	0,2577	0,2737	0,2897	0,3057	0,3219	0,3383	0,3548	0,3717
0,15	1,00	0,2668	0,2827	0,2986	0,3146	0,3307	0,3468	0,3632	0,3797	0,3965	0,4136
	1,05	0,2611	0,2772	0,2934	0,3095	0,3257	0,3420	0,3584	0,3750	0,3918	0,4090
	1,10	0,2556	0,2721	0,2884	0,3047	0,3210	0,3374	0,3539	0,3706	0,3875	0,4047
	1,15	0,2504	0,2671	0,2837	0,3001	0,3166	0,3331	0,3497	0,3665	0,3835	0,4007
	1,20	0,2453	0,2624	0,2792	0,2958	0,3124	0,3291	0,3458	0,3626	0,3797	0,3970
	1,25	0,2403	0,2578	0,2749	0,2917	0,3085	0,3253	0,3421	0,3590	0,3762	0,3935
	1,30	0,2354	0,2534	0,2708	0,2878	0,3048	0,3217	0,3386	0,3556	0,3728	0,3903
	1,35	0,2306	0,2491	0,2668	0,2841	0,3012	0,3183	0,3353	0,3524	0,3697	0,3872
	1,40	0,2257	0,2449	0,2630	0,2806	0,2979	0,3150	0,3322	0,3494	0,3667	0,3843
	1,45	0,2208	0,2407	0,2593	0,2771	0,2946	0,3119	0,3292	0,3465	0,3639	0,3816
	1,50	0,2157	0,2367	0,2557	0,2738	0,2915	0,3090	0,3264	0,3438	0,3613	0,3790
0,2	1,00	0,2869	0,3031	0,3193	0,3355	0,3518	0,3681	0,3847	0,4014	0,4184	0,4358
	1,05	0,2791	0,2957	0,3121	0,3286	0,3451	0,3616	0,3783	0,3952	0,4123	0,4297
	1,10	0,2713	0,2884	0,3052	0,3220	0,3387	0,3554	0,3723	0,3893	0,4065	0,4241
	1,15	0,2636	0,2812	0,2985	0,3156	0,3326	0,3495	0,3665	0,3837	0,4010	0,4187
	1,20	0,2556	0,2741	0,2919	0,3094	0,3267	0,3439	0,3611	0,3784	0,3959	0,4137
	1,25	0,2473	0,2670	0,2855	0,3034	0,3210	0,3384	0,3559	0,3734	0,3910	0,4089
	1,30	0,2382	0,2596	0,2790	0,2975	0,3155	0,3332	0,3509	0,3685	0,3863	0,4043
	1,35	0,2272	0,2518	0,2725	0,2916	0,3101	0,3282	0,3461	0,3639	0,3819	0,4000
	1,40		0,2433	0,2658	0,2858	0,3048	0,3233	0,3415	0,3595	0,3776	0,3959
	1,45		0,2331	0,2588	0,2800	0,2996	0,3185	0,3370	0,3553	0,3736	0,3920
	1,50			0,2512	0,2741	0,2945	0,3138	0,3327	0,3512	0,3697	0,3882
0,25	1,00	0,3107	0,3267	0,3428	0,3589	0,3751	0,3914	0,4079	0,4246	0,4417	0,4593
	1,05	0,3014	0,3179	0,3343	0,3506	0,3671	0,3836	0,4003	0,4172	0,4344	0,4521
	1,10	0,2921	0,3091	0,3259	0,3426	0,3593	0,3761	0,3930	0,4101	0,4274	0,4452
	1,15	0,2824	0,3002	0,3176	0,3347	0,3518	0,3689	0,3860	0,4033	0,4208	0,4387
	1,20	0,2722	0,2911	0,3092	0,3269	0,3444	0,3618	0,3792	0,3967	0,4144	0,4324
	1,25	0,2607	0,2815	0,3007	0,3191	0,3371	0,3549	0,3726	0,3904	0,4083	0,4265
	1,30	0,2459	0,2710	0,2919	0,3113	0,3299	0,3481	0,3662	0,3842	0,4024	0,4207
	1,35	0,2149	0,2584	0,2824	0,3032	0,3226	0,3414	0,3599	0,3783	0,3967	0,4152
	1,40	0,1906	0,2161	0,2716	0,2947	0,3153	0,3348	0,3537	0,3725	0,3911	0,4099
	1,45			0,2573	0,2854	0,3077	0,3281	0,3476	0,3668	0,3858	0,4048
	1,50				0,2746	0,2997	0,3213	0,3416	0,3612	0,3805	0,3998
0,3	1,00	0,3359	0,3517	0,3674	0,3833	0,3993	0,4154	0,4317	0,4482	0,4653	0,4813
	1,05	0,3260	0,3421	0,3582	0,3743	0,3905	0,4068	0,4233	0,4401	0,4572	0,4751
	1,10	0,3160	0,3325	0,3489	0,3654	0,3819	0,3985	0,4152	0,4321	0,4494	0,4673
	1,15	0,3056	0,3228	0,3397	0,3566	0,3734	0,3903	0,4072	0,4244	0,4419	0,4599
	1,20	0,2945	0,3126	0,3303	0,3477	0,3650	0,3822	0,3995	0,4169	0,4346	0,4528
	1,25	0,2820	0,3019	0,3206	0,3387	0,3566	0,3742	0,3919	0,4096	0,4275	0,4459
	1,30	0,2658	0,2897	0,3103	0,3295	0,3480	0,3663	0,3843	0,4024	0,4206	0,4392
	1,35	0,2512	0,2743	0,2988	0,3197	0,3393	0,3582	0,3768	0,3953	0,4139	0,4326
	1,40	0,2433	0,2525	0,2846	0,3090	0,3302	0,3501	0,3693	0,3883	0,4072	0,4263
	1,45	0,2232	0,2437	0,2540	0,2964	0,3204	0,3416	0,3618	0,3813	0,4006	0,4200
	1,50			0,2441	0,2769	0,3093	0,3327	0,3540	0,3743	0,3941	0,4139

μ_{lu} pour S 500 PH ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 21

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2488	0,2626	0,2766	0,2909	0,3054	0,3201	0,3350	0,3503	0,3658	0,3817
0,05	1,00	0,2554	0,2700	0,2849	0,2999	0,3151	0,3305	0,3461	0,3620	0,3781	0,3946
	1,05	0,2541	0,2688	0,2836	0,2986	0,3138	0,3292	0,3449	0,3607	0,3769	0,3934
	1,10	0,2529	0,2676	0,2825	0,2975	0,3127	0,3281	0,3437	0,3596	0,3758	0,3922
	1,15	0,2519	0,2665	0,2814	0,2964	0,3116	0,3270	0,3427	0,3586	0,3747	0,3912
	1,20	0,2509	0,2656	0,2804	0,2955	0,3107	0,3261	0,3417	0,3576	0,3738	0,3902
	1,25	0,2500	0,2647	0,2795	0,2946	0,3098	0,3252	0,3408	0,3567	0,3729	0,3894
	1,30	0,2491	0,2638	0,2787	0,2937	0,3089	0,3244	0,3400	0,3559	0,3721	0,3886
	1,35	0,2483	0,2630	0,2779	0,2930	0,3082	0,3236	0,3393	0,3551	0,3713	0,3878
	1,40	0,2476	0,2623	0,2772	0,2922	0,3075	0,3229	0,3385	0,3544	0,3706	0,3871
	1,45	0,2469	0,2616	0,2765	0,2916	0,3068	0,3222	0,3379	0,3538	0,3699	0,3864
	1,50	0,2463	0,2610	0,2759	0,2909	0,3062	0,3216	0,3373	0,3532	0,3693	0,3858
0,1	1,00	0,2647	0,2802	0,2959	0,3116	0,3275	0,3435	0,3597	0,3761	0,3928	0,4099
	1,05	0,2617	0,2773	0,2930	0,3088	0,3247	0,3408	0,3570	0,3735	0,3902	0,4073
	1,10	0,2590	0,2746	0,2904	0,3062	0,3222	0,3383	0,3545	0,3710	0,3878	0,4049
	1,15	0,2564	0,2721	0,2879	0,3038	0,3198	0,3360	0,3523	0,3688	0,3855	0,4026
	1,20	0,2540	0,2698	0,2857	0,3016	0,3176	0,3338	0,3501	0,3667	0,3835	0,4006
	1,25	0,2518	0,2676	0,2836	0,2995	0,3156	0,3318	0,3482	0,3647	0,3816	0,3987
	1,30	0,2497	0,2656	0,2816	0,2976	0,3137	0,3300	0,3463	0,3629	0,3798	0,3969
	1,35	0,2477	0,2637	0,2797	0,2958	0,3120	0,3282	0,3446	0,3613	0,3781	0,3953
	1,40	0,2458	0,2619	0,2780	0,2941	0,3103	0,3266	0,3430	0,3597	0,3766	0,3937
	1,45	0,2441	0,2602	0,2764	0,2925	0,3087	0,3251	0,3415	0,3582	0,3751	0,3923
	1,50	0,2424	0,2586	0,2748	0,2910	0,3073	0,3236	0,3401	0,3568	0,3737	0,3909
0,15	1,00	0,2777	0,2940	0,3102	0,3265	0,3429	0,3594	0,3760	0,3928	0,4099	0,4274
	1,05	0,2726	0,2891	0,3056	0,3220	0,3385	0,3550	0,3718	0,3887	0,4058	0,4234
	1,10	0,2678	0,2846	0,3012	0,3177	0,3343	0,3510	0,3678	0,3848	0,4021	0,4196
	1,15	0,2633	0,2802	0,2970	0,3137	0,3305	0,3473	0,3642	0,3812	0,3985	0,4162
	1,20	0,2589	0,2761	0,2931	0,3100	0,3268	0,3437	0,3607	0,3779	0,3952	0,4129
	1,25	0,2546	0,2722	0,2894	0,3064	0,3234	0,3404	0,3575	0,3747	0,3922	0,4099
	1,30	0,2505	0,2684	0,2858	0,3031	0,3202	0,3373	0,3545	0,3718	0,3893	0,4071
	1,35	0,2466	0,2648	0,2825	0,2999	0,3171	0,3344	0,3516	0,3690	0,3866	0,4044
	1,40	0,2427	0,2613	0,2792	0,2968	0,3142	0,3316	0,3489	0,3664	0,3840	0,4019
	1,45	0,2388	0,2579	0,2761	0,2939	0,3115	0,3289	0,3464	0,3639	0,3816	0,3995
	1,50	0,2351	0,2546	0,2732	0,2911	0,3089	0,3264	0,3440	0,3616	0,3793	0,3973
0,2	1,00	0,2950	0,3116	0,3281	0,3446	0,3612	0,3779	0,3947	0,4117	0,4291	0,4468
	1,05	0,2878	0,3048	0,3216	0,3384	0,3552	0,3721	0,3890	0,4062	0,4236	0,4415
	1,10	0,2808	0,2983	0,3154	0,3325	0,3495	0,3665	0,3837	0,4010	0,4185	0,4365
	1,15	0,2739	0,2919	0,3094	0,3268	0,3441	0,3613	0,3786	0,3961	0,4137	0,4318
	1,20	0,2669	0,2856	0,3036	0,3213	0,3389	0,3563	0,3738	0,3914	0,4092	0,4273
	1,25	0,2598	0,2793	0,2979	0,3160	0,3339	0,3516	0,3692	0,3870	0,4049	0,4231
	1,30	0,2523	0,2731	0,2924	0,3109	0,3291	0,3470	0,3649	0,3828	0,4008	0,4192
	1,35	0,2441	0,2667	0,2868	0,3059	0,3244	0,3426	0,3607	0,3788	0,3970	0,4154
	1,40	0,2344	0,2601	0,2813	0,3010	0,3199	0,3384	0,3567	0,3750	0,3933	0,4119
	1,45		0,2530	0,2757	0,2962	0,3155	0,3343	0,3529	0,3713	0,3898	0,4085
	1,50		0,2450	0,2700	0,2914	0,3112	0,3304	0,3492	0,3678	0,3865	0,4052
0,25	1,00	0,3159	0,3324	0,3488	0,3653	0,3818	0,3984	0,4152	0,4322	0,4496	0,4676
	1,05	0,3072	0,3242	0,3410	0,3577	0,3745	0,3914	0,4083	0,4255	0,4431	0,4612
	1,10	0,2985	0,3160	0,3333	0,3504	0,3675	0,3846	0,4018	0,4192	0,4368	0,4550
	1,15	0,2895	0,3078	0,3256	0,3432	0,3606	0,3780	0,3955	0,4131	0,4309	0,4492
	1,20	0,2800	0,2995	0,3180	0,3361	0,3540	0,3717	0,3894	0,4072	0,4252	0,4437
	1,25	0,2695	0,2908	0,3104	0,3291	0,3474	0,3655	0,3835	0,4016	0,4198	0,4384
	1,30	0,2567	0,2815	0,3025	0,3221	0,3410	0,3595	0,3779	0,3962	0,4146	0,4334
	1,35	0,2136	0,2708	0,2943	0,3150	0,3346	0,3536	0,3723	0,3909	0,4096	0,4285
	1,40		0,2563	0,2853	0,3077	0,3282	0,3478	0,3669	0,3859	0,4048	0,4239
	1,45			0,2748	0,3001	0,3218	0,3421	0,3617	0,3809	0,4001	0,4194
	1,50			0,2597	0,2918	0,3152	0,3363	0,3565	0,3761	0,3956	0,4151
0,3	1,00	0,3390	0,3551	0,3712	0,3874	0,4036	0,4200	0,4365	0,4534	0,4707	0,4838
	1,05	0,3295	0,3460	0,3625	0,3790	0,3955	0,4121	0,4289	0,4459	0,4634	0,4807
	1,10	0,3199	0,3369	0,3538	0,3707	0,3875	0,4044	0,4214	0,4387	0,4563	0,4747
	1,15	0,3098	0,3276	0,3451	0,3624	0,3797	0,3969	0,4142	0,4317	0,4495	0,4680
	1,20	0,2990	0,3180	0,3363	0,3542	0,3719	0,3895	0,4071	0,4249	0,4430	0,4616
	1,25	0,2866	0,3077	0,3272	0,3459	0,3642	0,3822	0,4002	0,4183	0,4366	0,4554
	1,30	0,2698	0,2960	0,3175	0,3373	0,3564	0,3750	0,3934	0,4118	0,4304	0,4494
	1,35	0,2506	0,2811	0,3068	0,3284	0,3484	0,3678	0,3867	0,4055	0,4244	0,4436
	1,40	0,2392	0,2520	0,2939	0,3187	0,3402	0,3604	0,3800	0,3993	0,4185	0,4380
	1,45		0,2374	0,2683	0,3076	0,3316	0,3530	0,3733	0,3931	0,4127	0,4325
	1,50			0,2346	0,2929	0,3221	0,3452	0,3665	0,3870	0,4070	0,4271

μ_{lu} pour S 500 PH ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 24

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2620	0,2762	0,2906	0,3053	0,3201	0,3352	0,3505	0,3661	0,3820	0,3983
0,05	1,00	0,2679	0,2829	0,2980	0,3133	0,3288	0,3445	0,3604	0,3766	0,3931	0,4099
	1,05	0,2667	0,2817	0,2969	0,3122	0,3277	0,3434	0,3593	0,3755	0,3919	0,4088
	1,10	0,2657	0,2807	0,2958	0,3112	0,3267	0,3424	0,3583	0,3745	0,3909	0,4078
	1,15	0,2647	0,2797	0,2949	0,3102	0,3257	0,3414	0,3574	0,3735	0,3900	0,4069
	1,20	0,2638	0,2789	0,2940	0,3094	0,3249	0,3406	0,3565	0,3727	0,3892	0,4060
	1,25	0,2630	0,2780	0,2932	0,3086	0,3241	0,3398	0,3557	0,3719	0,3884	0,4052
	1,30	0,2623	0,2773	0,2925	0,3078	0,3233	0,3391	0,3550	0,3712	0,3877	0,4045
	1,35	0,2616	0,2766	0,2918	0,3071	0,3227	0,3384	0,3543	0,3705	0,3870	0,4038
	1,40	0,2609	0,2759	0,2911	0,3065	0,3220	0,3377	0,3537	0,3699	0,3864	0,4032
	1,45	0,2603	0,2753	0,2905	0,3059	0,3214	0,3372	0,3531	0,3693	0,3858	0,4026
	1,50	0,2597	0,2748	0,2900	0,3053	0,3209	0,3366	0,3526	0,3688	0,3852	0,4021
0,1	1,00	0,2760	0,2918	0,3077	0,3236	0,3397	0,3560	0,3724	0,3891	0,4061	0,4234
	1,05	0,2733	0,2892	0,3051	0,3211	0,3373	0,3536	0,3700	0,3867	0,4037	0,4211
	1,10	0,2709	0,2868	0,3028	0,3188	0,3350	0,3513	0,3679	0,3846	0,4016	0,4190
	1,15	0,2686	0,2846	0,3006	0,3167	0,3329	0,3493	0,3658	0,3826	0,3996	0,4170
	1,20	0,2665	0,2825	0,2986	0,3147	0,3310	0,3474	0,3640	0,3807	0,3978	0,4152
	1,25	0,2645	0,2806	0,2967	0,3129	0,3292	0,3456	0,3622	0,3790	0,3961	0,4135
	1,30	0,2627	0,2788	0,2950	0,3112	0,3275	0,3440	0,3606	0,3774	0,3945	0,4120
	1,35	0,2610	0,2771	0,2934	0,3096	0,3260	0,3425	0,3591	0,3759	0,3931	0,4105
	1,40	0,2593	0,2756	0,2918	0,3081	0,3245	0,3410	0,3577	0,3746	0,3917	0,4092
	1,45	0,2578	0,2741	0,2904	0,3067	0,3231	0,3397	0,3564	0,3733	0,3904	0,4079
	1,50	0,2564	0,2727	0,2890	0,3054	0,3219	0,3384	0,3551	0,3720	0,3892	0,4067
0,15	1,00	0,2872	0,3037	0,3202	0,3367	0,3532	0,3699	0,3868	0,4038	0,4211	0,4389
	1,05	0,2827	0,2994	0,3160	0,3326	0,3493	0,3661	0,3830	0,4001	0,4175	0,4353
	1,10	0,2784	0,2953	0,3121	0,3288	0,3456	0,3625	0,3795	0,3967	0,4142	0,4320
	1,15	0,2744	0,2915	0,3084	0,3253	0,3422	0,3592	0,3763	0,3935	0,4110	0,4289
	1,20	0,2705	0,2878	0,3049	0,3220	0,3390	0,3560	0,3732	0,3906	0,4081	0,4261
	1,25	0,2669	0,2844	0,3017	0,3188	0,3360	0,3531	0,3704	0,3878	0,4054	0,4234
	1,30	0,2633	0,2811	0,2986	0,3159	0,3331	0,3504	0,3677	0,3852	0,4029	0,4209
	1,35	0,2599	0,2780	0,2956	0,3131	0,3304	0,3478	0,3652	0,3827	0,4005	0,4186
	1,40	0,2567	0,2750	0,2928	0,3104	0,3279	0,3454	0,3628	0,3804	0,3983	0,4164
	1,45	0,2535	0,2721	0,2902	0,3079	0,3255	0,3430	0,3606	0,3783	0,3961	0,4143
	1,50	0,2504	0,2694	0,2876	0,3055	0,3232	0,3409	0,3585	0,3762	0,3941	0,4124
0,2	1,00	0,3022	0,3191	0,3358	0,3526	0,3694	0,3863	0,4033	0,4205	0,4381	0,4562
	1,05	0,2957	0,3129	0,3300	0,3470	0,3640	0,3810	0,3982	0,4155	0,4332	0,4514
	1,10	0,2894	0,3070	0,3244	0,3416	0,3588	0,3761	0,3934	0,4109	0,4287	0,4469
	1,15	0,2832	0,3013	0,3190	0,3365	0,3540	0,3714	0,3889	0,4065	0,4244	0,4427
	1,20	0,2770	0,2957	0,3138	0,3317	0,3493	0,3669	0,3846	0,4024	0,4204	0,4388
	1,25	0,2708	0,2902	0,3088	0,3270	0,3449	0,3627	0,3805	0,3985	0,4166	0,4351
	1,30	0,2645	0,2848	0,3039	0,3225	0,3407	0,3587	0,3767	0,3948	0,4130	0,4316
	1,35	0,2580	0,2794	0,2992	0,3181	0,3366	0,3549	0,3730	0,3912	0,4096	0,4283
	1,40	0,2509	0,2740	0,2945	0,3139	0,3327	0,3512	0,3695	0,3879	0,4064	0,4251
	1,45	0,2429	0,2684	0,2898	0,3097	0,3289	0,3476	0,3662	0,3847	0,4033	0,4222
	1,50	0,2325	0,2626	0,2852	0,3057	0,3252	0,3442	0,3630	0,3817	0,4004	0,4193
0,25	1,00	0,3208	0,3376	0,3543	0,3710	0,3878	0,4046	0,4215	0,4388	0,4564	0,4748
	1,05	0,3127	0,3300	0,3471	0,3641	0,3811	0,3981	0,4153	0,4327	0,4505	0,4689
	1,10	0,3046	0,3224	0,3400	0,3573	0,3746	0,3920	0,4094	0,4269	0,4449	0,4634
	1,15	0,2963	0,3149	0,3330	0,3508	0,3684	0,3860	0,4037	0,4215	0,4395	0,4582
	1,20	0,2876	0,3073	0,3261	0,3444	0,3624	0,3803	0,3982	0,4162	0,4345	0,4532
	1,25	0,2782	0,2995	0,3192	0,3381	0,3565	0,3748	0,3930	0,4112	0,4296	0,4485
	1,30	0,2672	0,2912	0,3122	0,3318	0,3508	0,3694	0,3879	0,4064	0,4250	0,4440
	1,35	0,2510	0,2822	0,3050	0,3256	0,3451	0,3642	0,3830	0,4017	0,4206	0,4397
	1,40		0,2715	0,2974	0,3192	0,3396	0,3591	0,3783	0,3973	0,4163	0,4356
	1,45		0,2540	0,2891	0,3128	0,3340	0,3541	0,3736	0,3929	0,4122	0,4317
	1,50			0,2795	0,3060	0,3284	0,3491	0,3691	0,3887	0,4083	0,4279
0,3	1,00	0,3420	0,3583	0,3747	0,3911	0,4075	0,4241	0,4408	0,4578	0,4754	0,4859
	1,05	0,3329	0,3497	0,3665	0,3832	0,3999	0,4168	0,4337	0,4510	0,4687	0,4831
	1,10	0,3236	0,3411	0,3583	0,3755	0,3926	0,4097	0,4269	0,4444	0,4623	0,4805
	1,15	0,3140	0,3323	0,3502	0,3678	0,3853	0,4028	0,4203	0,4380	0,4561	0,4750
	1,20	0,3036	0,3232	0,3419	0,3602	0,3782	0,3960	0,4139	0,4319	0,4502	0,4692
	1,25	0,2916	0,3135	0,3334	0,3525	0,3711	0,3894	0,4076	0,4259	0,4444	0,4636
	1,30	0,2752	0,3026	0,3245	0,3447	0,3640	0,3828	0,4014	0,4201	0,4389	0,4582
	1,35	0,2498	0,2889	0,3148	0,3365	0,3568	0,3763	0,3954	0,4144	0,4335	0,4530
	1,40		0,2513	0,3034	0,3279	0,3494	0,3697	0,3894	0,4088	0,4282	0,4480
	1,45			0,2869	0,3183	0,3418	0,3631	0,3835	0,4034	0,4231	0,4431
	1,50				0,3068	0,3337	0,3564	0,3775	0,3980	0,4181	0,4384

μ_{lu} pour S 500 PH ; f_{ck} = 25 MPa ; α_e = 27

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2732	0,2878	0,3025	0,3174	0,3325	0,3479	0,3635	0,3793	0,3955	0,4121
0,05	1,00	0,2785	0,2937	0,3091	0,3246	0,3404	0,3563	0,3724	0,3888	0,4055	0,4226
	1,05	0,2775	0,2927	0,3081	0,3236	0,3393	0,3553	0,3714	0,3878	0,4045	0,4216
	1,10	0,2765	0,2918	0,3072	0,3227	0,3384	0,3543	0,3705	0,3869	0,4036	0,4207
	1,15	0,2757	0,2909	0,3063	0,3219	0,3376	0,3535	0,3696	0,3860	0,4028	0,4199
	1,20	0,2749	0,2901	0,3055	0,3211	0,3368	0,3527	0,3689	0,3853	0,4020	0,4191
	1,25	0,2741	0,2894	0,3048	0,3204	0,3361	0,3520	0,3682	0,3846	0,4013	0,4184
	1,30	0,2735	0,2887	0,3041	0,3197	0,3354	0,3514	0,3675	0,3839	0,4006	0,4177
	1,35	0,2728	0,2881	0,3035	0,3191	0,3348	0,3508	0,3669	0,3833	0,4000	0,4171
	1,40	0,2722	0,2875	0,3029	0,3185	0,3342	0,3502	0,3664	0,3828	0,3995	0,4166
	1,45	0,2717	0,2870	0,3024	0,3180	0,3337	0,3497	0,3658	0,3822	0,3990	0,4161
	1,50	0,2712	0,2864	0,3019	0,3175	0,3332	0,3492	0,3653	0,3818	0,3985	0,4156
0,1	1,00	0,2857	0,3017	0,3177	0,3338	0,3501	0,3665	0,3831	0,4000	0,4171	0,4347
	1,05	0,2833	0,2993	0,3154	0,3316	0,3479	0,3644	0,3810	0,3979	0,4150	0,4326
	1,10	0,2811	0,2972	0,3133	0,3295	0,3459	0,3624	0,3790	0,3959	0,4131	0,4307
	1,15	0,2791	0,2952	0,3114	0,3276	0,3440	0,3605	0,3772	0,3941	0,4114	0,4290
	1,20	0,2772	0,2934	0,3096	0,3259	0,3423	0,3588	0,3755	0,3925	0,4097	0,4274
	1,25	0,2754	0,2916	0,3079	0,3242	0,3407	0,3572	0,3740	0,3910	0,4082	0,4259
	1,30	0,2738	0,2900	0,3063	0,3227	0,3392	0,3558	0,3725	0,3895	0,4068	0,4245
	1,35	0,2722	0,2885	0,3049	0,3213	0,3378	0,3544	0,3712	0,3882	0,4055	0,4232
	1,40	0,2708	0,2871	0,3035	0,3199	0,3365	0,3531	0,3699	0,3870	0,4043	0,4220
	1,45	0,2694	0,2858	0,3022	0,3187	0,3353	0,3519	0,3688	0,3858	0,4031	0,4208
	1,50	0,2681	0,2846	0,3010	0,3175	0,3341	0,3508	0,3677	0,3847	0,4021	0,4198
0,15	1,00	0,2956	0,3122	0,3288	0,3454	0,3621	0,3789	0,3959	0,4131	0,4306	0,4486
	1,05	0,2915	0,3083	0,3250	0,3418	0,3586	0,3755	0,3925	0,4098	0,4273	0,4454
	1,10	0,2876	0,3046	0,3215	0,3384	0,3553	0,3723	0,3894	0,4067	0,4243	0,4424
	1,15	0,2840	0,3012	0,3182	0,3352	0,3522	0,3693	0,3865	0,4039	0,4215	0,4397
	1,20	0,2806	0,2979	0,3151	0,3322	0,3493	0,3665	0,3838	0,4012	0,4190	0,4371
	1,25	0,2774	0,2949	0,3122	0,3294	0,3466	0,3639	0,3812	0,3987	0,4165	0,4347
	1,30	0,2743	0,2920	0,3094	0,3268	0,3441	0,3614	0,3788	0,3964	0,4143	0,4325
	1,35	0,2713	0,2892	0,3068	0,3243	0,3417	0,3591	0,3766	0,3943	0,4122	0,4304
	1,40	0,2685	0,2866	0,3044	0,3220	0,3395	0,3570	0,3745	0,3922	0,4102	0,4285
	1,45	0,2658	0,2841	0,3020	0,3197	0,3373	0,3549	0,3725	0,3903	0,4083	0,4266
	1,50	0,2631	0,2817	0,2998	0,3176	0,3353	0,3530	0,3707	0,3885	0,4065	0,4249
0,2	1,00	0,3087	0,3257	0,3427	0,3596	0,3765	0,3935	0,4106	0,4280	0,4457	0,4641
	1,05	0,3028	0,3201	0,3373	0,3544	0,3716	0,3887	0,4060	0,4235	0,4414	0,4598
	1,10	0,2970	0,3148	0,3323	0,3496	0,3669	0,3843	0,4017	0,4193	0,4373	0,4557
	1,15	0,2915	0,3096	0,3274	0,3450	0,3625	0,3801	0,3976	0,4154	0,4334	0,4520
	1,20	0,2860	0,3046	0,3228	0,3406	0,3584	0,3761	0,3938	0,4117	0,4298	0,4484
	1,25	0,2805	0,2997	0,3183	0,3365	0,3544	0,3723	0,3902	0,4082	0,4264	0,4451
	1,30	0,2751	0,2950	0,3140	0,3324	0,3506	0,3687	0,3868	0,4049	0,4232	0,4420
	1,35	0,2696	0,2903	0,3098	0,3286	0,3470	0,3653	0,3835	0,4018	0,4202	0,4391
	1,40	0,2640	0,2857	0,3057	0,3249	0,3436	0,3620	0,3804	0,3988	0,4174	0,4363
	1,45	0,2581	0,2811	0,3017	0,3213	0,3403	0,3589	0,3774	0,3960	0,4146	0,4336
	1,50	0,2516	0,2764	0,2978	0,3178	0,3371	0,3559	0,3746	0,3933	0,4121	0,4311
0,25	1,00	0,3254	0,3424	0,3593	0,3761	0,3930	0,4100	0,4271	0,4444	0,4622	0,4804
	1,05	0,3178	0,3353	0,3525	0,3697	0,3869	0,4041	0,4214	0,4389	0,4568	0,4756
	1,10	0,3102	0,3283	0,3460	0,3635	0,3810	0,3984	0,4160	0,4337	0,4518	0,4706
	1,15	0,3025	0,3213	0,3396	0,3575	0,3753	0,3930	0,4108	0,4287	0,4469	0,4658
	1,20	0,2946	0,3144	0,3333	0,3517	0,3698	0,3878	0,4059	0,4240	0,4424	0,4614
	1,25	0,2862	0,3074	0,3271	0,3460	0,3645	0,3829	0,4011	0,4195	0,4380	0,4571
	1,30	0,2769	0,3001	0,3208	0,3404	0,3594	0,3780	0,3966	0,4151	0,4339	0,4531
	1,35	0,2651	0,2924	0,3145	0,3348	0,3543	0,3734	0,3922	0,4110	0,4299	0,4493
	1,40		0,2838	0,3080	0,3293	0,3494	0,3689	0,3880	0,4070	0,4261	0,4456
	1,45		0,2733	0,3012	0,3237	0,3445	0,3644	0,3839	0,4032	0,4225	0,4421
	1,50			0,2938	0,3181	0,3397	0,3601	0,3799	0,3995	0,4190	0,4388
0,3	1,00	0,3447	0,3613	0,3779	0,3944	0,4110	0,4277	0,4446	0,4617	0,4795	0,4878
	1,05	0,3361	0,3532	0,3702	0,3871	0,4040	0,4209	0,4380	0,4554	0,4733	0,4852
	1,10	0,3273	0,3450	0,3625	0,3798	0,3971	0,4144	0,4318	0,4494	0,4675	0,4827
	1,15	0,3181	0,3367	0,3549	0,3727	0,3904	0,4080	0,4257	0,4436	0,4618	0,4805
	1,20	0,3082	0,3282	0,3472	0,3657	0,3838	0,4018	0,4198	0,4380	0,4564	0,4758
	1,25	0,2969	0,3191	0,3393	0,3586	0,3773	0,3957	0,4141	0,4325	0,4512	0,4707
	1,30	0,2818	0,3091	0,3311	0,3514	0,3708	0,3898	0,4085	0,4273	0,4462	0,4658
	1,35	0,2485	0,2969	0,3223	0,3440	0,3643	0,3839	0,4030	0,4221	0,4414	0,4611
	1,40		0,2721	0,3124	0,3363	0,3577	0,3780	0,3977	0,4171	0,4367	0,4566
	1,45			0,2997	0,3280	0,3510	0,3721	0,3924	0,4123	0,4321	0,4522
	1,50				0,3186	0,3440	0,3662	0,3871	0,4075	0,4276	0,4480

μ_{lu} pour S 500 PH ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 6

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1390	0,1480	0,1573	0,1668	0,1765	0,1865	0,1967	0,2071	0,2178	0,2286
0,05	1,00	0,1538	0,1645	0,1753	0,1862	0,1974	0,2087	0,2202	0,2319	0,2438	0,2559
	1,05	0,1511	0,1618	0,1726	0,1836	0,1947	0,2060	0,2175	0,2292	0,2411	0,2532
	1,10	0,1487	0,1594	0,1702	0,1812	0,1923	0,2036	0,2151	0,2268	0,2387	0,2508
	1,15	0,1464	0,1571	0,1679	0,1789	0,1900	0,2013	0,2128	0,2245	0,2364	0,2485
	1,20	0,1442	0,1550	0,1658	0,1768	0,1880	0,1993	0,2107	0,2224	0,2343	0,2464
	1,25	0,1422	0,1530	0,1639	0,1749	0,1860	0,1973	0,2088	0,2205	0,2323	0,2444
	1,30	0,1403	0,1511	0,1620	0,1731	0,1842	0,1955	0,2070	0,2187	0,2305	0,2426
	1,35	0,1386	0,1494	0,1603	0,1714	0,1825	0,1938	0,2053	0,2170	0,2288	0,2409
	1,40	0,1369	0,1478	0,1587	0,1698	0,1809	0,1923	0,2038	0,2154	0,2273	0,2393
	1,45	0,1353	0,1462	0,1572	0,1683	0,1795	0,1908	0,2023	0,2139	0,2258	0,2378
	1,50	0,1338	0,1448	0,1558	0,1669	0,1781	0,1894	0,2009	0,2126	0,2244	0,2365
0,1	1,00	0,1796	0,1915	0,2034	0,2155	0,2277	0,2400	0,2525	0,2652	0,2781	0,2911
	1,05	0,1735	0,1855	0,1975	0,2097	0,2219	0,2343	0,2469	0,2595	0,2724	0,2855
	1,10	0,1676	0,1798	0,1920	0,2042	0,2165	0,2290	0,2415	0,2543	0,2672	0,2802
	1,15	0,1617	0,1742	0,1866	0,1990	0,2114	0,2239	0,2366	0,2493	0,2622	0,2753
	1,20	0,1560	0,1688	0,1815	0,1940	0,2066	0,2192	0,2319	0,2447	0,2576	0,2707
	1,25	0,1501	0,1635	0,1765	0,1892	0,2019	0,2146	0,2274	0,2403	0,2533	0,2664
	1,30	0,1440	0,1582	0,1716	0,1846	0,1975	0,2103	0,2232	0,2361	0,2492	0,2624
	1,35	0,1373	0,1528	0,1667	0,1801	0,1932	0,2062	0,2192	0,2322	0,2453	0,2585
	1,40	0,1292	0,1471	0,1619	0,1757	0,1891	0,2022	0,2153	0,2284	0,2416	0,2549
	1,45		0,1409	0,1570	0,1713	0,1850	0,1984	0,2116	0,2249	0,2381	0,2515
	1,50		0,1334	0,1519	0,1670	0,1811	0,1947	0,2081	0,2214	0,2348	0,2482
0,15	1,00	0,2144	0,2268	0,2393	0,2520	0,2648	0,2778	0,2909	0,3042	0,3177	0,3314
	1,05	0,2058	0,2183	0,2309	0,2437	0,2565	0,2695	0,2827	0,2960	0,3095	0,3233
	1,10	0,1973	0,2100	0,2228	0,2357	0,2486	0,2617	0,2749	0,2883	0,3018	0,3156
	1,15	0,1886	0,2018	0,2148	0,2279	0,2410	0,2542	0,2675	0,2809	0,2945	0,3083
	1,20	0,1797	0,1935	0,2069	0,2203	0,2336	0,2469	0,2603	0,2739	0,2875	0,3014
	1,25	0,1700	0,1848	0,1990	0,2127	0,2263	0,2399	0,2535	0,2671	0,2809	0,2948
	1,30	0,1582	0,1755	0,1907	0,2051	0,2191	0,2330	0,2468	0,2606	0,2745	0,2885
	1,35	0,1376	0,1643	0,1818	0,1973	0,2119	0,2262	0,2402	0,2543	0,2683	0,2824
	1,40	0,1322	0,1380	0,1716	0,1890	0,2046	0,2194	0,2338	0,2481	0,2623	0,2766
	1,45	0,1215	0,1319	0,1556	0,1797	0,1969	0,2125	0,2274	0,2420	0,2565	0,2709
	1,50			0,1316	0,1675	0,1885	0,2054	0,2210	0,2360	0,2508	0,2655
0,2	1,00	0,2523	0,2651	0,2780	0,2911	0,3043	0,3177	0,3313	0,3451	0,3591	0,3733
	1,05	0,2423	0,2551	0,2681	0,2811	0,2944	0,3078	0,3214	0,3351	0,3491	0,3633
	1,10	0,2325	0,2454	0,2584	0,2715	0,2848	0,2982	0,3118	0,3256	0,3396	0,3538
	1,15	0,2226	0,2357	0,2489	0,2621	0,2755	0,2890	0,3027	0,3165	0,3305	0,3447
	1,20	0,2125	0,2260	0,2394	0,2529	0,2664	0,2800	0,2938	0,3077	0,3217	0,3360
	1,25	0,2019	0,2160	0,2298	0,2436	0,2574	0,2712	0,2851	0,2991	0,3133	0,3276
	1,30	0,1898	0,2053	0,2199	0,2343	0,2484	0,2625	0,2766	0,2908	0,3051	0,3195
	1,35	0,1785	0,1930	0,2093	0,2245	0,2393	0,2538	0,2682	0,2826	0,2971	0,3117
	1,40	0,1740	0,1791	0,1969	0,2140	0,2297	0,2449	0,2598	0,2745	0,2892	0,3040
	1,45	0,1691	0,1744	0,1796	0,2017	0,2194	0,2356	0,2512	0,2664	0,2814	0,2964
	1,50	0,1633	0,1692	0,1748	0,1820	0,2074	0,2257	0,2423	0,2581	0,2736	0,2890
0,25	1,00	0,2893	0,3025	0,3158	0,3293	0,3430	0,3568	0,3708	0,3850	0,3994	0,4141
	1,05	0,2786	0,2918	0,3051	0,3185	0,3321	0,3459	0,3598	0,3740	0,3883	0,4029
	1,10	0,2681	0,2813	0,2946	0,3080	0,3216	0,3353	0,3492	0,3633	0,3777	0,3923
	1,15	0,2578	0,2710	0,2843	0,2977	0,3113	0,3250	0,3390	0,3531	0,3674	0,3820
	1,20	0,2473	0,2607	0,2741	0,2876	0,3012	0,3150	0,3290	0,3432	0,3575	0,3721
	1,25	0,2367	0,2502	0,2638	0,2775	0,2913	0,3052	0,3193	0,3335	0,3479	0,3625
	1,30	0,2254	0,2395	0,2535	0,2674	0,2814	0,2955	0,3097	0,3240	0,3385	0,3532
	1,35	0,2168	0,2280	0,2426	0,2570	0,2714	0,2857	0,3001	0,3146	0,3293	0,3440
	1,40	0,2123	0,2175	0,2309	0,2462	0,2611	0,2759	0,2906	0,3053	0,3201	0,3351
	1,45	0,2078	0,2130	0,2183	0,2342	0,2502	0,2656	0,2809	0,2960	0,3111	0,3262
	1,50	0,2031	0,2084	0,2137	0,2198	0,2381	0,2548	0,2708	0,2864	0,3019	0,3174
0,3	1,00	0,3236	0,3373	0,3511	0,3650	0,3791	0,3933	0,4077	0,4223	0,4371	0,4523
	1,05	0,3127	0,3263	0,3400	0,3538	0,3678	0,3819	0,3962	0,4107	0,4255	0,4405
	1,10	0,3020	0,3155	0,3291	0,3429	0,3568	0,3708	0,3851	0,3995	0,4142	0,4292
	1,15	0,2915	0,3049	0,3185	0,3322	0,3461	0,3601	0,3743	0,3887	0,4033	0,4182
	1,20	0,2810	0,2944	0,3080	0,3217	0,3355	0,3495	0,3637	0,3781	0,3927	0,4076
	1,25	0,2704	0,2839	0,2975	0,3113	0,3252	0,3392	0,3534	0,3678	0,3824	0,3973
	1,30	0,2597	0,2733	0,2870	0,3009	0,3149	0,3290	0,3432	0,3577	0,3723	0,3872
	1,35	0,2524	0,2624	0,2764	0,2904	0,3045	0,3188	0,3332	0,3477	0,3624	0,3774
	1,40	0,2479	0,2534	0,2652	0,2796	0,2940	0,3085	0,3231	0,3378	0,3526	0,3676
	1,45	0,2434	0,2489	0,2544	0,2683	0,2832	0,2980	0,3129	0,3278	0,3428	0,3580
	1,50	0,2389	0,2443	0,2498	0,2560	0,2718	0,2872	0,3025	0,3177	0,3330	0,3484

μ_{lu} pour S 500 PH ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 9

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1793	0,1904	0,2017	0,2133	0,2251	0,2372	0,2495	0,2620	0,2748	0,2879
0,05	1,00	0,1905	0,2029	0,2155	0,2283	0,2412	0,2544	0,2677	0,2813	0,2951	0,3092
	1,05	0,1885	0,2009	0,2134	0,2262	0,2391	0,2523	0,2656	0,2792	0,2930	0,3071
	1,10	0,1865	0,1990	0,2115	0,2243	0,2372	0,2504	0,2637	0,2773	0,2911	0,3052
	1,15	0,1848	0,1972	0,2098	0,2225	0,2355	0,2486	0,2620	0,2756	0,2893	0,3034
	1,20	0,1831	0,1956	0,2082	0,2209	0,2339	0,2470	0,2604	0,2739	0,2877	0,3018
	1,25	0,1816	0,1941	0,2067	0,2194	0,2324	0,2455	0,2589	0,2724	0,2862	0,3003
	1,30	0,1802	0,1927	0,2053	0,2181	0,2310	0,2442	0,2575	0,2711	0,2848	0,2989
	1,35	0,1789	0,1914	0,2040	0,2168	0,2297	0,2429	0,2562	0,2698	0,2835	0,2976
	1,40	0,1777	0,1902	0,2028	0,2156	0,2285	0,2417	0,2550	0,2686	0,2823	0,2964
	1,45	0,1765	0,1890	0,2016	0,2144	0,2274	0,2405	0,2539	0,2674	0,2812	0,2952
	1,50	0,1754	0,1879	0,2006	0,2134	0,2263	0,2395	0,2528	0,2664	0,2802	0,2942
0,1	1,00	0,2084	0,2220	0,2357	0,2494	0,2634	0,2774	0,2917	0,3061	0,3207	0,3356
	1,05	0,2035	0,2172	0,2310	0,2448	0,2588	0,2729	0,2872	0,3016	0,3163	0,3312
	1,10	0,1988	0,2127	0,2265	0,2405	0,2545	0,2687	0,2830	0,2975	0,3122	0,3270
	1,15	0,1943	0,2084	0,2224	0,2364	0,2505	0,2648	0,2791	0,2936	0,3083	0,3232
	1,20	0,1901	0,2043	0,2185	0,2326	0,2468	0,2611	0,2755	0,2900	0,3048	0,3197
	1,25	0,1859	0,2004	0,2147	0,2290	0,2433	0,2576	0,2721	0,2867	0,3014	0,3164
	1,30	0,1819	0,1967	0,2112	0,2256	0,2400	0,2544	0,2689	0,2835	0,2983	0,3133
	1,35	0,1780	0,1931	0,2078	0,2223	0,2368	0,2513	0,2659	0,2806	0,2954	0,3104
	1,40	0,1742	0,1897	0,2046	0,2193	0,2338	0,2484	0,2630	0,2778	0,2926	0,3077
	1,45	0,1704	0,1863	0,2015	0,2163	0,2310	0,2457	0,2604	0,2751	0,2900	0,3051
	1,50	0,1666	0,1830	0,1985	0,2135	0,2283	0,2430	0,2578	0,2726	0,2876	0,3027
0,15	1,00	0,2338	0,2481	0,2623	0,2767	0,2912	0,3058	0,3206	0,3356	0,3507	0,3662
	1,05	0,2261	0,2406	0,2551	0,2696	0,2842	0,2989	0,3138	0,3288	0,3441	0,3595
	1,10	0,2186	0,2334	0,2481	0,2628	0,2776	0,2924	0,3074	0,3225	0,3378	0,3533
	1,15	0,2110	0,2263	0,2414	0,2563	0,2713	0,2862	0,3013	0,3165	0,3319	0,3475
	1,20	0,2033	0,2193	0,2347	0,2500	0,2652	0,2803	0,2955	0,3109	0,3263	0,3420
	1,25	0,1952	0,2122	0,2282	0,2439	0,2593	0,2747	0,2900	0,3055	0,3210	0,3368
	1,30	0,1863	0,2049	0,2217	0,2379	0,2536	0,2692	0,2848	0,3004	0,3160	0,3318
	1,35	0,1752	0,1971	0,2151	0,2319	0,2481	0,2640	0,2797	0,2955	0,3112	0,3271
	1,40		0,1883	0,2083	0,2259	0,2426	0,2588	0,2748	0,2907	0,3067	0,3227
	1,45		0,1768	0,2010	0,2199	0,2372	0,2538	0,2701	0,2862	0,3023	0,3184
	1,50			0,1928	0,2137	0,2318	0,2489	0,2655	0,2819	0,2981	0,3144
0,2	1,00	0,2645	0,2789	0,2933	0,3079	0,3226	0,3375	0,3526	0,3678	0,3833	0,3991
	1,05	0,2550	0,2696	0,2842	0,2990	0,3138	0,3288	0,3440	0,3593	0,3748	0,3907
	1,10	0,2455	0,2604	0,2754	0,2903	0,3054	0,3205	0,3357	0,3512	0,3668	0,3827
	1,15	0,2358	0,2513	0,2666	0,2819	0,2971	0,3124	0,3279	0,3434	0,3592	0,3751
	1,20	0,2256	0,2420	0,2578	0,2735	0,2891	0,3046	0,3202	0,3360	0,3518	0,3679
	1,25	0,2144	0,2322	0,2489	0,2652	0,2811	0,2970	0,3129	0,3288	0,3448	0,3610
	1,30	0,2003	0,2215	0,2396	0,2567	0,2732	0,2895	0,3057	0,3218	0,3380	0,3543
	1,35	0,1780	0,2084	0,2296	0,2480	0,2653	0,2821	0,2986	0,3150	0,3314	0,3479
	1,40	0,1708	0,1787	0,2178	0,2387	0,2571	0,2746	0,2916	0,3084	0,3250	0,3418
	1,45		0,1704	0,1988	0,2281	0,2486	0,2670	0,2846	0,3018	0,3188	0,3358
	1,50			0,1698	0,2144	0,2392	0,2592	0,2776	0,2954	0,3127	0,3299
0,25	1,00	0,2967	0,3111	0,3256	0,3403	0,3551	0,3701	0,3853	0,4007	0,4164	0,4324
	1,05	0,2863	0,3008	0,3155	0,3303	0,3452	0,3603	0,3755	0,3910	0,4067	0,4228
	1,10	0,2759	0,2907	0,3055	0,3205	0,3355	0,3507	0,3661	0,3817	0,3974	0,4135
	1,15	0,2653	0,2805	0,2956	0,3108	0,3261	0,3414	0,3569	0,3726	0,3885	0,4047
	1,20	0,2544	0,2701	0,2857	0,3012	0,3168	0,3323	0,3480	0,3639	0,3799	0,3962
	1,25	0,2425	0,2593	0,2755	0,2916	0,3075	0,3234	0,3393	0,3553	0,3715	0,3879
	1,30	0,2287	0,2475	0,2649	0,2817	0,2981	0,3144	0,3307	0,3470	0,3634	0,3800
	1,35	0,2164	0,2334	0,2532	0,2713	0,2886	0,3054	0,3221	0,3387	0,3554	0,3722
	1,40	0,2108	0,2173	0,2393	0,2600	0,2785	0,2962	0,3135	0,3305	0,3475	0,3646
	1,45	0,2043	0,2114	0,2182	0,2465	0,2677	0,2867	0,3047	0,3223	0,3397	0,3571
	1,50	0,1947	0,2043	0,2120	0,2235	0,2550	0,2764	0,2956	0,3140	0,3319	0,3497
0,3	1,00	0,3279	0,3424	0,3570	0,3718	0,3867	0,4017	0,4170	0,4325	0,4483	0,4646
	1,05	0,3172	0,3318	0,3464	0,3612	0,3762	0,3913	0,4066	0,4221	0,4380	0,4543
	1,10	0,3066	0,3212	0,3360	0,3509	0,3659	0,3811	0,3965	0,4121	0,4280	0,4443
	1,15	0,2959	0,3107	0,3257	0,3407	0,3559	0,3712	0,3867	0,4024	0,4183	0,4347
	1,20	0,2849	0,3001	0,3153	0,3305	0,3459	0,3614	0,3770	0,3928	0,4089	0,4253
	1,25	0,2734	0,2891	0,3047	0,3203	0,3359	0,3517	0,3675	0,3835	0,3997	0,4162
	1,30	0,2609	0,2775	0,2938	0,3099	0,3259	0,3419	0,3580	0,3743	0,3906	0,4073
	1,35	0,2521	0,2646	0,2821	0,2990	0,3156	0,3321	0,3486	0,3651	0,3817	0,3986
	1,40	0,2469	0,2532	0,2690	0,2874	0,3049	0,3221	0,3390	0,3559	0,3729	0,3899
	1,45	0,2415	0,2479	0,2543	0,2742	0,2934	0,3116	0,3293	0,3467	0,3640	0,3814
	1,50	0,2355	0,2422	0,2489	0,2568	0,2803	0,3003	0,3191	0,3372	0,3551	0,3729

μ_{lu} pour S 500 PH ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 12

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2096	0,2220	0,2346	0,2475	0,2606	0,2740	0,2876	0,3015	0,3156	0,3301
0,05	1,00	0,2186	0,2321	0,2458	0,2597	0,2737	0,2880	0,3025	0,3172	0,3322	0,3475
	1,05	0,2169	0,2304	0,2441	0,2580	0,2720	0,2863	0,3008	0,3155	0,3305	0,3458
	1,10	0,2153	0,2288	0,2425	0,2564	0,2705	0,2848	0,2993	0,3140	0,3289	0,3442
	1,15	0,2139	0,2274	0,2411	0,2550	0,2691	0,2833	0,2978	0,3125	0,3275	0,3428
	1,20	0,2126	0,2261	0,2398	0,2537	0,2678	0,2820	0,2965	0,3112	0,3262	0,3415
	1,25	0,2113	0,2249	0,2386	0,2525	0,2665	0,2808	0,2953	0,3100	0,3250	0,3402
	1,30	0,2102	0,2237	0,2375	0,2513	0,2654	0,2797	0,2942	0,3089	0,3239	0,3391
	1,35	0,2091	0,2227	0,2364	0,2503	0,2644	0,2787	0,2931	0,3079	0,3228	0,3381
	1,40	0,2082	0,2217	0,2354	0,2493	0,2634	0,2777	0,2922	0,3069	0,3219	0,3371
	1,45	0,2072	0,2208	0,2345	0,2484	0,2625	0,2768	0,2913	0,3060	0,3210	0,3362
	1,50	0,2064	0,2199	0,2337	0,2476	0,2616	0,2759	0,2904	0,3051	0,3201	0,3353
0,1	1,00	0,2322	0,2467	0,2614	0,2762	0,2911	0,3062	0,3214	0,3369	0,3526	0,3685
	1,05	0,2281	0,2428	0,2576	0,2724	0,2874	0,3025	0,3178	0,3332	0,3490	0,3649
	1,10	0,2243	0,2391	0,2540	0,2689	0,2839	0,2991	0,3144	0,3299	0,3456	0,3616
	1,15	0,2208	0,2357	0,2506	0,2656	0,2807	0,2959	0,3112	0,3268	0,3425	0,3585
	1,20	0,2174	0,2325	0,2475	0,2625	0,2777	0,2929	0,3083	0,3239	0,3397	0,3557
	1,25	0,2143	0,2294	0,2446	0,2597	0,2749	0,2902	0,3056	0,3212	0,3370	0,3531
	1,30	0,2113	0,2266	0,2418	0,2570	0,2722	0,2876	0,3031	0,3187	0,3345	0,3506
	1,35	0,2084	0,2238	0,2392	0,2545	0,2698	0,2852	0,3007	0,3163	0,3322	0,3483
	1,40	0,2057	0,2213	0,2367	0,2521	0,2674	0,2829	0,2984	0,3141	0,3300	0,3461
	1,45	0,2030	0,2188	0,2343	0,2498	0,2652	0,2807	0,2963	0,3121	0,3280	0,3441
	1,50	0,2005	0,2165	0,2321	0,2477	0,2632	0,2787	0,2943	0,3101	0,3260	0,3422
0,15	1,00	0,2515	0,2668	0,2821	0,2975	0,3130	0,3286	0,3443	0,3603	0,3764	0,3929
	1,05	0,2449	0,2605	0,2760	0,2915	0,3071	0,3228	0,3387	0,3547	0,3709	0,3874
	1,10	0,2385	0,2543	0,2701	0,2858	0,3016	0,3174	0,3333	0,3494	0,3657	0,3823
	1,15	0,2322	0,2484	0,2645	0,2804	0,2963	0,3123	0,3284	0,3445	0,3609	0,3775
	1,20	0,2260	0,2427	0,2591	0,2753	0,2914	0,3075	0,3236	0,3399	0,3564	0,3731
	1,25	0,2197	0,2371	0,2539	0,2703	0,2866	0,3029	0,3192	0,3356	0,3521	0,3689
	1,30	0,2134	0,2315	0,2488	0,2656	0,2821	0,2985	0,3150	0,3315	0,3481	0,3649
	1,35	0,2068	0,2260	0,2438	0,2609	0,2777	0,2944	0,3109	0,3276	0,3443	0,3612
	1,40	0,1996	0,2204	0,2389	0,2565	0,2735	0,2904	0,3071	0,3239	0,3407	0,3577
	1,45	0,1911	0,2146	0,2340	0,2521	0,2695	0,2865	0,3035	0,3203	0,3372	0,3543
	1,50	0,1781	0,2085	0,2292	0,2478	0,2656	0,2829	0,2999	0,3169	0,3340	0,3511
0,2	1,00	0,2762	0,2917	0,3072	0,3228	0,3384	0,3542	0,3702	0,3864	0,4028	0,4195
	1,05	0,2675	0,2833	0,2991	0,3149	0,3308	0,3467	0,3628	0,3791	0,3956	0,4124
	1,10	0,2588	0,2751	0,2912	0,3073	0,3234	0,3395	0,3558	0,3722	0,3889	0,4058
	1,15	0,2500	0,2669	0,2835	0,2999	0,3163	0,3327	0,3491	0,3657	0,3824	0,3994
	1,20	0,2408	0,2586	0,2759	0,2927	0,3094	0,3260	0,3427	0,3594	0,3763	0,3934
	1,25	0,2308	0,2501	0,2682	0,2856	0,3027	0,3196	0,3365	0,3534	0,3705	0,3877
	1,30	0,2189	0,2411	0,2604	0,2785	0,2961	0,3134	0,3305	0,3477	0,3649	0,3823
	1,35	0,1770	0,2309	0,2522	0,2714	0,2896	0,3073	0,3247	0,3421	0,3595	0,3771
	1,40		0,2177	0,2434	0,2641	0,2831	0,3013	0,3191	0,3368	0,3544	0,3721
	1,45			0,2333	0,2564	0,2765	0,2954	0,3136	0,3316	0,3494	0,3673
	1,50			0,2190	0,2482	0,2698	0,2894	0,3082	0,3265	0,3446	0,3627
0,25	1,00	0,3039	0,3192	0,3347	0,3502	0,3658	0,3816	0,3976	0,4138	0,4303	0,4472
	1,05	0,2940	0,3096	0,3253	0,3411	0,3569	0,3729	0,3890	0,4053	0,4219	0,4389
	1,10	0,2840	0,3001	0,3161	0,3321	0,3482	0,3644	0,3807	0,3972	0,4139	0,4310
	1,15	0,2737	0,2905	0,3070	0,3233	0,3397	0,3561	0,3727	0,3893	0,4062	0,4234
	1,20	0,2629	0,2806	0,2977	0,3146	0,3314	0,3481	0,3649	0,3817	0,3988	0,4162
	1,25	0,2507	0,2701	0,2882	0,3058	0,3231	0,3402	0,3573	0,3744	0,3917	0,4092
	1,30	0,2351	0,2584	0,2783	0,2968	0,3147	0,3323	0,3498	0,3672	0,3847	0,4024
	1,35	0,2158	0,2438	0,2673	0,2875	0,3063	0,3245	0,3424	0,3602	0,3780	0,3959
	1,40	0,2079	0,2168	0,2541	0,2773	0,2976	0,3166	0,3351	0,3533	0,3714	0,3896
	1,45		0,2078	0,2180	0,2656	0,2883	0,3085	0,3277	0,3465	0,3649	0,3834
	1,50			0,2075	0,2493	0,2780	0,3001	0,3203	0,3396	0,3586	0,3774
0,3	1,00	0,3320	0,3472	0,3625	0,3779	0,3934	0,4090	0,4249	0,4410	0,4576	0,4748
	1,05	0,3217	0,3371	0,3525	0,3681	0,3838	0,3996	0,4156	0,4319	0,4485	0,4656
	1,10	0,3113	0,3270	0,3427	0,3585	0,3743	0,3904	0,4065	0,4229	0,4397	0,4569
	1,15	0,3006	0,3167	0,3328	0,3489	0,3651	0,3813	0,3977	0,4143	0,4311	0,4484
	1,20	0,2894	0,3062	0,3228	0,3393	0,3558	0,3724	0,3890	0,4058	0,4228	0,4403
	1,25	0,2772	0,2952	0,3125	0,3296	0,3466	0,3635	0,3804	0,3975	0,4148	0,4324
	1,30	0,2627	0,2830	0,3017	0,3196	0,3372	0,3546	0,3719	0,3893	0,4068	0,4246
	1,35	0,2517	0,2683	0,2897	0,3091	0,3276	0,3456	0,3634	0,3812	0,3990	0,4171
	1,40	0,2455	0,2529	0,2753	0,2975	0,3174	0,3364	0,3549	0,3731	0,3913	0,4097
	1,45	0,2382	0,2464	0,2542	0,2837	0,3064	0,3268	0,3461	0,3650	0,3837	0,4023
	1,50	0,2251	0,2382	0,2473	0,2605	0,2935	0,3164	0,3370	0,3567	0,3760	0,3951

μ_{lu} pour S 500 PH ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 15

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2330	0,2463	0,2598	0,2735	0,2875	0,3017	0,3162	0,3310	0,3460	0,3613
0,05	1,00	0,2405	0,2548	0,2692	0,2838	0,2986	0,3136	0,3288	0,3442	0,3600	0,3760
	1,05	0,2391	0,2533	0,2677	0,2823	0,2971	0,3121	0,3273	0,3428	0,3585	0,3746
	1,10	0,2378	0,2520	0,2664	0,2810	0,2958	0,3108	0,3260	0,3415	0,3572	0,3733
	1,15	0,2365	0,2508	0,2652	0,2798	0,2946	0,3096	0,3249	0,3403	0,3560	0,3721
	1,20	0,2354	0,2497	0,2641	0,2787	0,2935	0,3085	0,3238	0,3392	0,3550	0,3710
	1,25	0,2344	0,2487	0,2631	0,2777	0,2925	0,3075	0,3228	0,3382	0,3539	0,3700
	1,30	0,2334	0,2477	0,2622	0,2768	0,2916	0,3066	0,3218	0,3373	0,3530	0,3690
	1,35	0,2326	0,2468	0,2613	0,2759	0,2907	0,3057	0,3209	0,3364	0,3521	0,3682
	1,40	0,2317	0,2460	0,2605	0,2751	0,2899	0,3049	0,3201	0,3356	0,3513	0,3674
	1,45	0,2309	0,2452	0,2597	0,2743	0,2891	0,3041	0,3194	0,3348	0,3506	0,3666
	1,50	0,2302	0,2445	0,2590	0,2736	0,2884	0,3034	0,3187	0,3341	0,3499	0,3659
0,1	1,00	0,2514	0,2666	0,2819	0,2973	0,3128	0,3285	0,3444	0,3605	0,3768	0,3934
	1,05	0,2480	0,2633	0,2787	0,2941	0,3097	0,3254	0,3413	0,3574	0,3738	0,3905
	1,10	0,2449	0,2602	0,2757	0,2912	0,3068	0,3226	0,3385	0,3546	0,3710	0,3877
	1,15	0,2419	0,2574	0,2729	0,2884	0,3041	0,3199	0,3359	0,3520	0,3685	0,3852
	1,20	0,2392	0,2547	0,2703	0,2859	0,3016	0,3174	0,3335	0,3496	0,3661	0,3828
	1,25	0,2366	0,2522	0,2678	0,2835	0,2993	0,3152	0,3312	0,3474	0,3639	0,3806
	1,30	0,2342	0,2499	0,2656	0,2813	0,2971	0,3130	0,3291	0,3453	0,3618	0,3786
	1,35	0,2319	0,2477	0,2634	0,2792	0,2951	0,3110	0,3271	0,3434	0,3599	0,3767
	1,40	0,2297	0,2456	0,2614	0,2773	0,2932	0,3092	0,3253	0,3416	0,3581	0,3749
	1,45	0,2276	0,2436	0,2595	0,2754	0,2914	0,3074	0,3236	0,3399	0,3564	0,3732
	1,50	0,2257	0,2418	0,2577	0,2737	0,2897	0,3057	0,3219	0,3383	0,3548	0,3717
0,15	1,00	0,2668	0,2827	0,2986	0,3146	0,3307	0,3468	0,3632	0,3797	0,3965	0,4136
	1,05	0,2611	0,2772	0,2934	0,3095	0,3257	0,3420	0,3584	0,3750	0,3918	0,4090
	1,10	0,2556	0,2721	0,2884	0,3047	0,3210	0,3374	0,3539	0,3706	0,3875	0,4047
	1,15	0,2504	0,2671	0,2837	0,3001	0,3166	0,3331	0,3497	0,3665	0,3835	0,4007
	1,20	0,2453	0,2624	0,2792	0,2958	0,3124	0,3291	0,3458	0,3626	0,3797	0,3970
	1,25	0,2403	0,2578	0,2749	0,2917	0,3085	0,3253	0,3421	0,3590	0,3762	0,3935
	1,30	0,2354	0,2534	0,2708	0,2878	0,3048	0,3217	0,3386	0,3556	0,3728	0,3903
	1,35	0,2306	0,2491	0,2668	0,2841	0,3012	0,3183	0,3353	0,3524	0,3697	0,3872
	1,40	0,2257	0,2449	0,2630	0,2806	0,2979	0,3150	0,3322	0,3494	0,3667	0,3843
	1,45	0,2208	0,2407	0,2593	0,2771	0,2946	0,3119	0,3292	0,3465	0,3639	0,3816
	1,50	0,2157	0,2367	0,2557	0,2738	0,2915	0,3090	0,3264	0,3438	0,3613	0,3790
0,2	1,00	0,2869	0,3031	0,3193	0,3355	0,3518	0,3681	0,3847	0,4014	0,4184	0,4358
	1,05	0,2791	0,2957	0,3121	0,3286	0,3451	0,3616	0,3783	0,3952	0,4123	0,4297
	1,10	0,2713	0,2884	0,3052	0,3220	0,3387	0,3554	0,3723	0,3893	0,4065	0,4241
	1,15	0,2636	0,2812	0,2985	0,3156	0,3326	0,3495	0,3665	0,3837	0,4010	0,4187
	1,20	0,2556	0,2741	0,2919	0,3094	0,3267	0,3439	0,3611	0,3784	0,3959	0,4137
	1,25	0,2473	0,2670	0,2855	0,3034	0,3210	0,3384	0,3559	0,3734	0,3910	0,4089
	1,30	0,2382	0,2596	0,2790	0,2975	0,3155	0,3332	0,3509	0,3685	0,3863	0,4043
	1,35	0,2272	0,2518	0,2725	0,2916	0,3101	0,3282	0,3461	0,3639	0,3819	0,4000
	1,40		0,2433	0,2658	0,2858	0,3048	0,3233	0,3415	0,3595	0,3776	0,3959
	1,45		0,2331	0,2588	0,2800	0,2996	0,3185	0,3370	0,3553	0,3736	0,3920
	1,50			0,2512	0,2741	0,2945	0,3138	0,3327	0,3512	0,3697	0,3882
0,25	1,00	0,3107	0,3267	0,3428	0,3589	0,3751	0,3914	0,4079	0,4246	0,4417	0,4593
	1,05	0,3014	0,3179	0,3343	0,3506	0,3671	0,3836	0,4003	0,4172	0,4344	0,4521
	1,10	0,2921	0,3091	0,3259	0,3426	0,3593	0,3761	0,3930	0,4101	0,4274	0,4452
	1,15	0,2824	0,3002	0,3176	0,3347	0,3518	0,3689	0,3860	0,4033	0,4208	0,4387
	1,20	0,2722	0,2911	0,3092	0,3269	0,3444	0,3618	0,3792	0,3967	0,4144	0,4324
	1,25	0,2607	0,2815	0,3007	0,3191	0,3371	0,3549	0,3726	0,3904	0,4083	0,4265
	1,30	0,2459	0,2710	0,2919	0,3113	0,3299	0,3481	0,3662	0,3842	0,4024	0,4207
	1,35	0,2149	0,2584	0,2824	0,3032	0,3226	0,3414	0,3599	0,3783	0,3967	0,4152
	1,40	0,1906	0,2161	0,2716	0,2947	0,3153	0,3348	0,3537	0,3725	0,3911	0,4099
	1,45			0,2573	0,2854	0,3077	0,3281	0,3476	0,3668	0,3858	0,4048
	1,50				0,2746	0,2997	0,3213	0,3416	0,3612	0,3805	0,3998
0,3	1,00	0,3359	0,3517	0,3674	0,3833	0,3993	0,4154	0,4317	0,4482	0,4653	0,4813
	1,05	0,3260	0,3421	0,3582	0,3743	0,3905	0,4068	0,4233	0,4401	0,4572	0,4751
	1,10	0,3160	0,3325	0,3489	0,3654	0,3819	0,3985	0,4152	0,4321	0,4494	0,4673
	1,15	0,3056	0,3228	0,3397	0,3566	0,3734	0,3903	0,4072	0,4244	0,4419	0,4599
	1,20	0,2945	0,3126	0,3303	0,3477	0,3650	0,3822	0,3995	0,4169	0,4346	0,4528
	1,25	0,2820	0,3019	0,3206	0,3387	0,3566	0,3742	0,3919	0,4096	0,4275	0,4459
	1,30	0,2658	0,2897	0,3103	0,3295	0,3480	0,3663	0,3843	0,4024	0,4206	0,4392
	1,35	0,2512	0,2743	0,2988	0,3197	0,3393	0,3582	0,3768	0,3953	0,4139	0,4326
	1,40	0,2433	0,2525	0,2846	0,3090	0,3302	0,3501	0,3693	0,3883	0,4072	0,4263
	1,45	0,2232	0,2437	0,2540	0,2964	0,3204	0,3416	0,3618	0,3813	0,4006	0,4200
	1,50			0,2441	0,2769	0,3093	0,3327	0,3540	0,3743	0,3941	0,4139

μ_{lu} pour S 500 PH ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 18

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2516	0,2655	0,2796	0,2940	0,3085	0,3233	0,3384	0,3537	0,3693	0,3853
0,05	1,00	0,2580	0,2728	0,2877	0,3028	0,3180	0,3335	0,3492	0,3651	0,3814	0,3979
	1,05	0,2568	0,2715	0,2865	0,3015	0,3168	0,3323	0,3480	0,3639	0,3801	0,3967
	1,10	0,2557	0,2704	0,2853	0,3004	0,3157	0,3312	0,3469	0,3628	0,3790	0,3956
	1,15	0,2546	0,2694	0,2843	0,2994	0,3147	0,3301	0,3458	0,3618	0,3780	0,3946
	1,20	0,2536	0,2684	0,2833	0,2984	0,3137	0,3292	0,3449	0,3609	0,3771	0,3937
	1,25	0,2528	0,2675	0,2825	0,2976	0,3128	0,3283	0,3440	0,3600	0,3762	0,3928
	1,30	0,2519	0,2667	0,2816	0,2967	0,3120	0,3275	0,3432	0,3592	0,3754	0,3920
	1,35	0,2512	0,2659	0,2809	0,2960	0,3113	0,3268	0,3425	0,3585	0,3747	0,3913
	1,40	0,2504	0,2652	0,2802	0,2953	0,3106	0,3261	0,3418	0,3578	0,3740	0,3906
	1,45	0,2498	0,2646	0,2795	0,2946	0,3099	0,3254	0,3412	0,3571	0,3734	0,3899
	1,50	0,2492	0,2640	0,2789	0,2940	0,3093	0,3248	0,3406	0,3565	0,3728	0,3893
0,1	1,00	0,2671	0,2827	0,2984	0,3142	0,3301	0,3462	0,3624	0,3789	0,3957	0,4128
	1,05	0,2642	0,2799	0,2956	0,3114	0,3274	0,3435	0,3598	0,3763	0,3931	0,4102
	1,10	0,2615	0,2772	0,2930	0,3089	0,3249	0,3411	0,3574	0,3739	0,3908	0,4079
	1,15	0,2590	0,2748	0,2907	0,3066	0,3226	0,3388	0,3552	0,3717	0,3886	0,4057
	1,20	0,2567	0,2725	0,2884	0,3044	0,3205	0,3367	0,3531	0,3697	0,3866	0,4037
	1,25	0,2545	0,2704	0,2864	0,3024	0,3185	0,3348	0,3512	0,3678	0,3847	0,4019
	1,30	0,2524	0,2684	0,2845	0,3005	0,3167	0,3330	0,3494	0,3661	0,3830	0,4002
	1,35	0,2505	0,2666	0,2827	0,2988	0,3150	0,3313	0,3478	0,3644	0,3813	0,3986
	1,40	0,2487	0,2648	0,2810	0,2971	0,3133	0,3297	0,3462	0,3629	0,3798	0,3971
	1,45	0,2470	0,2632	0,2794	0,2956	0,3118	0,3282	0,3447	0,3614	0,3784	0,3957
	1,50	0,2454	0,2617	0,2779	0,2941	0,3104	0,3268	0,3434	0,3601	0,3771	0,3943
0,15	1,00	0,2797	0,2960	0,3123	0,3287	0,3451	0,3616	0,3783	0,3952	0,4123	0,4299
	1,05	0,2748	0,2913	0,3078	0,3242	0,3408	0,3574	0,3742	0,3911	0,4083	0,4259
	1,10	0,2701	0,2868	0,3035	0,3201	0,3367	0,3535	0,3703	0,3874	0,4047	0,4223
	1,15	0,2656	0,2826	0,2994	0,3162	0,3330	0,3498	0,3668	0,3839	0,4012	0,4189
	1,20	0,2614	0,2786	0,2956	0,3125	0,3294	0,3464	0,3634	0,3806	0,3980	0,4158
	1,25	0,2572	0,2748	0,2920	0,3091	0,3261	0,3431	0,3603	0,3775	0,3950	0,4128
	1,30	0,2533	0,2711	0,2886	0,3058	0,3230	0,3401	0,3573	0,3747	0,3922	0,4100
	1,35	0,2494	0,2676	0,2853	0,3027	0,3200	0,3372	0,3545	0,3720	0,3896	0,4075
	1,40	0,2457	0,2642	0,2821	0,2997	0,3172	0,3345	0,3519	0,3694	0,3871	0,4050
	1,45	0,2420	0,2610	0,2791	0,2969	0,3145	0,3320	0,3494	0,3670	0,3847	0,4027
	1,50	0,2384	0,2578	0,2763	0,2942	0,3119	0,3295	0,3471	0,3647	0,3825	0,4005
0,2	1,00	0,2965	0,3131	0,3297	0,3463	0,3629	0,3797	0,3965	0,4136	0,4310	0,4488
	1,05	0,2895	0,3065	0,3234	0,3402	0,3571	0,3740	0,3910	0,4082	0,4257	0,4436
	1,10	0,2826	0,3001	0,3173	0,3344	0,3515	0,3686	0,3857	0,4031	0,4207	0,4387
	1,15	0,2758	0,2938	0,3115	0,3289	0,3462	0,3634	0,3808	0,3983	0,4160	0,4341
	1,20	0,2690	0,2877	0,3058	0,3235	0,3411	0,3586	0,3761	0,3937	0,4116	0,4298
	1,25	0,2621	0,2816	0,3002	0,3184	0,3362	0,3539	0,3716	0,3894	0,4074	0,4257
	1,30	0,2549	0,2756	0,2948	0,3134	0,3315	0,3495	0,3674	0,3853	0,4035	0,4218
	1,35	0,2471	0,2694	0,2895	0,3085	0,3270	0,3452	0,3633	0,3815	0,3997	0,4182
	1,40	0,2381	0,2630	0,2841	0,3037	0,3226	0,3411	0,3595	0,3777	0,3961	0,4147
	1,45	0,2257	0,2563	0,2788	0,2991	0,3184	0,3372	0,3557	0,3742	0,3927	0,4114
	1,50		0,2489	0,2733	0,2944	0,3142	0,3334	0,3522	0,3708	0,3895	0,4083
0,25	1,00	0,3169	0,3335	0,3500	0,3665	0,3831	0,3997	0,4166	0,4336	0,4510	0,4692
	1,05	0,3084	0,3254	0,3422	0,3591	0,3759	0,3928	0,4098	0,4271	0,4446	0,4628
	1,10	0,2997	0,3173	0,3347	0,3518	0,3690	0,3861	0,4034	0,4208	0,4385	0,4568
	1,15	0,2909	0,3093	0,3272	0,3448	0,3623	0,3797	0,3972	0,4148	0,4327	0,4511
	1,20	0,2816	0,3011	0,3197	0,3379	0,3557	0,3735	0,3913	0,4091	0,4272	0,4457
	1,25	0,2713	0,2926	0,3122	0,3310	0,3494	0,3675	0,3855	0,4036	0,4219	0,4406
	1,30	0,2588	0,2835	0,3045	0,3241	0,3431	0,3616	0,3800	0,3983	0,4168	0,4356
	1,35	0,2133	0,2732	0,2965	0,3172	0,3368	0,3559	0,3746	0,3932	0,4119	0,4309
	1,40		0,2597	0,2878	0,3102	0,3306	0,3502	0,3693	0,3883	0,4072	0,4264
	1,45			0,2779	0,3028	0,3244	0,3446	0,3642	0,3835	0,4027	0,4220
	1,50			0,2645	0,2948	0,3180	0,3390	0,3592	0,3788	0,3983	0,4179
0,3	1,00	0,3396	0,3558	0,3719	0,3881	0,4044	0,4208	0,4374	0,4543	0,4717	0,4843
	1,05	0,3302	0,3468	0,3633	0,3798	0,3964	0,4131	0,4299	0,4470	0,4645	0,4812
	1,10	0,3206	0,3378	0,3548	0,3717	0,3886	0,4055	0,4226	0,4399	0,4576	0,4761
	1,15	0,3107	0,3286	0,3462	0,3635	0,3808	0,3981	0,4155	0,4330	0,4509	0,4695
	1,20	0,2999	0,3191	0,3374	0,3554	0,3732	0,3909	0,4086	0,4264	0,4445	0,4632
	1,25	0,2876	0,3089	0,3285	0,3472	0,3656	0,3837	0,4018	0,4199	0,4383	0,4571
	1,30	0,2707	0,2973	0,3189	0,3388	0,3579	0,3766	0,3951	0,4136	0,4322	0,4513
	1,35	0,2505	0,2826	0,3084	0,3301	0,3502	0,3695	0,3885	0,4074	0,4263	0,4456
	1,40	0,2376	0,2519	0,2958	0,3206	0,3421	0,3624	0,3820	0,4013	0,4206	0,4401
	1,45		0,2342	0,2735	0,3098	0,3337	0,3551	0,3754	0,3953	0,4149	0,4347
	1,50			0,2280	0,2958	0,3245	0,3476	0,3689	0,3893	0,4094	0,4295

μ_{lu} pour S 500 PH ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 21

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2667	0,2810	0,2956	0,3104	0,3253	0,3405	0,3560	0,3717	0,3877	0,4041
0,05	1,00	0,2723	0,2874	0,3027	0,3181	0,3337	0,3494	0,3655	0,3817	0,3983	0,4152
	1,05	0,2712	0,2863	0,3016	0,3170	0,3326	0,3484	0,3644	0,3807	0,3972	0,4142
	1,10	0,2702	0,2853	0,3006	0,3160	0,3316	0,3474	0,3634	0,3797	0,3963	0,4132
	1,15	0,2693	0,2844	0,2997	0,3151	0,3307	0,3465	0,3625	0,3788	0,3954	0,4123
	1,20	0,2685	0,2836	0,2988	0,3143	0,3299	0,3457	0,3617	0,3780	0,3946	0,4115
	1,25	0,2677	0,2828	0,2981	0,3135	0,3291	0,3449	0,3610	0,3772	0,3938	0,4108
	1,30	0,2670	0,2821	0,2974	0,3128	0,3284	0,3442	0,3603	0,3766	0,3931	0,4101
	1,35	0,2663	0,2814	0,2967	0,3121	0,3278	0,3436	0,3596	0,3759	0,3925	0,4094
	1,40	0,2657	0,2808	0,2961	0,3115	0,3272	0,3430	0,3590	0,3753	0,3919	0,4089
	1,45	0,2651	0,2802	0,2955	0,3110	0,3266	0,3424	0,3585	0,3748	0,3913	0,4083
	1,50	0,2645	0,2797	0,2950	0,3104	0,3261	0,3419	0,3579	0,3742	0,3908	0,4078
0,1	1,00	0,2801	0,2959	0,3119	0,3279	0,3441	0,3604	0,3769	0,3937	0,4107	0,4282
	1,05	0,2775	0,2934	0,3094	0,3255	0,3417	0,3581	0,3746	0,3914	0,4085	0,4260
	1,10	0,2752	0,2911	0,3072	0,3233	0,3396	0,3560	0,3726	0,3894	0,4064	0,4239
	1,15	0,2730	0,2890	0,3051	0,3213	0,3376	0,3540	0,3706	0,3874	0,4046	0,4221
	1,20	0,2710	0,2871	0,3032	0,3194	0,3357	0,3522	0,3688	0,3857	0,4028	0,4203
	1,25	0,2691	0,2852	0,3014	0,3177	0,3340	0,3505	0,3672	0,3840	0,4012	0,4187
	1,30	0,2673	0,2835	0,2997	0,3160	0,3324	0,3489	0,3656	0,3825	0,3997	0,4172
	1,35	0,2657	0,2819	0,2982	0,3145	0,3309	0,3475	0,3642	0,3811	0,3983	0,4159
	1,40	0,2641	0,2804	0,2967	0,3131	0,3295	0,3461	0,3628	0,3798	0,3970	0,4146
	1,45	0,2627	0,2790	0,2954	0,3118	0,3282	0,3448	0,3616	0,3785	0,3958	0,4133
	1,50	0,2613	0,2777	0,2941	0,3105	0,3270	0,3436	0,3604	0,3774	0,3946	0,4122
0,15	1,00	0,2907	0,3072	0,3238	0,3403	0,3570	0,3737	0,3906	0,4077	0,4251	0,4430
	1,05	0,2864	0,3031	0,3198	0,3364	0,3532	0,3700	0,3870	0,4042	0,4216	0,4396
	1,10	0,2823	0,2992	0,3160	0,3328	0,3497	0,3666	0,3836	0,4009	0,4184	0,4364
	1,15	0,2784	0,2955	0,3125	0,3294	0,3464	0,3634	0,3805	0,3979	0,4155	0,4335
	1,20	0,2747	0,2921	0,3092	0,3263	0,3433	0,3604	0,3776	0,3950	0,4127	0,4307
	1,25	0,2712	0,2888	0,3061	0,3233	0,3404	0,3576	0,3749	0,3924	0,4101	0,4282
	1,30	0,2679	0,2857	0,3031	0,3205	0,3377	0,3550	0,3724	0,3899	0,4077	0,4258
	1,35	0,2647	0,2827	0,3003	0,3178	0,3352	0,3525	0,3700	0,3876	0,4054	0,4236
	1,40	0,2616	0,2799	0,2977	0,3153	0,3328	0,3502	0,3677	0,3854	0,4033	0,4215
	1,45	0,2587	0,2772	0,2952	0,3129	0,3305	0,3480	0,3656	0,3833	0,4013	0,4195
	1,50	0,2558	0,2746	0,2927	0,3106	0,3283	0,3460	0,3636	0,3814	0,3994	0,4176
0,2	1,00	0,3049	0,3218	0,3387	0,3555	0,3723	0,3893	0,4064	0,4236	0,4413	0,4595
	1,05	0,2986	0,3159	0,3330	0,3501	0,3671	0,3842	0,4015	0,4189	0,4366	0,4549
	1,10	0,2926	0,3102	0,3277	0,3450	0,3622	0,3795	0,3969	0,4144	0,4323	0,4506
	1,15	0,2866	0,3047	0,3225	0,3401	0,3575	0,3750	0,3925	0,4102	0,4282	0,4466
	1,20	0,2807	0,2994	0,3176	0,3354	0,3531	0,3708	0,3884	0,4063	0,4243	0,4428
	1,25	0,2749	0,2942	0,3128	0,3309	0,3489	0,3667	0,3846	0,4025	0,4207	0,4393
	1,30	0,2689	0,2891	0,3081	0,3266	0,3448	0,3629	0,3809	0,3990	0,4173	0,4360
	1,35	0,2629	0,2840	0,3036	0,3225	0,3410	0,3592	0,3774	0,3957	0,4141	0,4328
	1,40	0,2565	0,2789	0,2992	0,3185	0,3372	0,3557	0,3741	0,3925	0,4110	0,4298
	1,45	0,2495	0,2737	0,2948	0,3146	0,3337	0,3524	0,3709	0,3894	0,4081	0,4270
	1,50	0,2413	0,2685	0,2905	0,3108	0,3302	0,3492	0,3679	0,3865	0,4053	0,4243
0,25	1,00	0,3227	0,3396	0,3564	0,3731	0,3899	0,4068	0,4238	0,4411	0,4588	0,4774
	1,05	0,3148	0,3321	0,3493	0,3664	0,3835	0,4006	0,4178	0,4353	0,4531	0,4717
	1,10	0,3069	0,3248	0,3424	0,3599	0,3773	0,3946	0,4121	0,4298	0,4477	0,4664
	1,15	0,2988	0,3175	0,3357	0,3536	0,3713	0,3889	0,4066	0,4245	0,4426	0,4614
	1,20	0,2905	0,3102	0,3291	0,3474	0,3655	0,3834	0,4014	0,4195	0,4378	0,4566
	1,25	0,2815	0,3027	0,3224	0,3414	0,3599	0,3781	0,3964	0,4146	0,4331	0,4521
	1,30	0,2712	0,2949	0,3157	0,3354	0,3544	0,3730	0,3915	0,4100	0,4287	0,4478
	1,35	0,2572	0,2864	0,3089	0,3294	0,3490	0,3680	0,3868	0,4056	0,4245	0,4437
	1,40		0,2767	0,3018	0,3234	0,3437	0,3632	0,3823	0,4013	0,4204	0,4398
	1,45		0,2633	0,2942	0,3174	0,3384	0,3584	0,3779	0,3972	0,4165	0,4361
	1,50			0,2856	0,3111	0,3331	0,3537	0,3737	0,3932	0,4128	0,4325
0,3	1,00	0,3431	0,3596	0,3760	0,3925	0,4090	0,4256	0,4424	0,4594	0,4771	0,4867
	1,05	0,3342	0,3511	0,3680	0,3848	0,4016	0,4185	0,4355	0,4528	0,4706	0,4840
	1,10	0,3251	0,3427	0,3600	0,3773	0,3944	0,4116	0,4289	0,4465	0,4644	0,4814
	1,15	0,3156	0,3341	0,3521	0,3698	0,3874	0,4049	0,4225	0,4403	0,4585	0,4776
	1,20	0,3054	0,3252	0,3441	0,3624	0,3805	0,3984	0,4163	0,4344	0,4528	0,4719
	1,25	0,2937	0,3158	0,3359	0,3550	0,3736	0,3920	0,4103	0,4287	0,4473	0,4665
	1,30	0,2778	0,3052	0,3272	0,3474	0,3668	0,3857	0,4044	0,4231	0,4419	0,4614
	1,35	0,2493	0,2922	0,3179	0,3396	0,3599	0,3794	0,3986	0,4176	0,4368	0,4564
	1,40		0,2510	0,3071	0,3314	0,3529	0,3732	0,3929	0,4123	0,4318	0,4516
	1,45			0,2923	0,3223	0,3456	0,3669	0,3872	0,4071	0,4269	0,4469
	1,50				0,3118	0,3379	0,3605	0,3815	0,4019	0,4221	0,4424

μ_{lu} pour S 500 PH ; f_{ck} = 30 MPa ; α_o = 24

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2792	0,2939	0,3087	0,3238	0,3390	0,3545	0,3703	0,3863	0,4026	0,4193
0,05	1,00	0,2842	0,2995	0,3150	0,3306	0,3464	0,3624	0,3787	0,3952	0,4120	0,4292
	1,05	0,2832	0,2985	0,3140	0,3297	0,3455	0,3615	0,3777	0,3942	0,4110	0,4283
	1,10	0,2823	0,2976	0,3131	0,3288	0,3446	0,3606	0,3769	0,3934	0,4102	0,4274
	1,15	0,2815	0,2968	0,3123	0,3280	0,3438	0,3598	0,3761	0,3926	0,4094	0,4266
	1,20	0,2807	0,2961	0,3116	0,3273	0,3431	0,3591	0,3754	0,3919	0,4087	0,4259
	1,25	0,2800	0,2954	0,3109	0,3266	0,3424	0,3584	0,3747	0,3912	0,4080	0,4253
	1,30	0,2794	0,2948	0,3103	0,3259	0,3418	0,3578	0,3741	0,3906	0,4074	0,4247
	1,35	0,2788	0,2942	0,3097	0,3254	0,3412	0,3573	0,3735	0,3900	0,4069	0,4241
	1,40	0,2782	0,2936	0,3091	0,3248	0,3407	0,3567	0,3730	0,3895	0,4063	0,4236
	1,45	0,2777	0,2931	0,3086	0,3243	0,3402	0,3562	0,3725	0,3890	0,4058	0,4231
	1,50	0,2772	0,2926	0,3082	0,3238	0,3397	0,3558	0,3720	0,3886	0,4054	0,4226
0,1	1,00	0,2909	0,3069	0,3231	0,3393	0,3556	0,3721	0,3888	0,4057	0,4229	0,4406
	1,05	0,2886	0,3047	0,3209	0,3371	0,3535	0,3700	0,3868	0,4037	0,4210	0,4387
	1,10	0,2866	0,3027	0,3189	0,3352	0,3516	0,3682	0,3849	0,4019	0,4192	0,4369
	1,15	0,2846	0,3008	0,3171	0,3334	0,3498	0,3664	0,3832	0,4002	0,4175	0,4352
	1,20	0,2829	0,2991	0,3154	0,3317	0,3482	0,3648	0,3816	0,3987	0,4160	0,4337
	1,25	0,2812	0,2975	0,3138	0,3302	0,3467	0,3634	0,3802	0,3972	0,4146	0,4323
	1,30	0,2797	0,2960	0,3123	0,3288	0,3453	0,3620	0,3788	0,3959	0,4132	0,4310
	1,35	0,2782	0,2946	0,3110	0,3274	0,3440	0,3607	0,3776	0,3946	0,4120	0,4298
	1,40	0,2769	0,2933	0,3097	0,3262	0,3428	0,3595	0,3764	0,3935	0,4109	0,4287
	1,45	0,2756	0,2920	0,3085	0,3250	0,3416	0,3584	0,3753	0,3924	0,4098	0,4276
	1,50	0,2744	0,2909	0,3074	0,3239	0,3406	0,3573	0,3742	0,3914	0,4088	0,4266
0,15	1,00	0,3001	0,3167	0,3334	0,3501	0,3668	0,3837	0,4007	0,4180	0,4356	0,4537
	1,05	0,2962	0,3130	0,3298	0,3466	0,3635	0,3804	0,3975	0,4149	0,4325	0,4507
	1,10	0,2926	0,3096	0,3265	0,3434	0,3604	0,3774	0,3946	0,4120	0,4297	0,4479
	1,15	0,2892	0,3064	0,3234	0,3404	0,3575	0,3746	0,3919	0,4093	0,4271	0,4453
	1,20	0,2860	0,3033	0,3205	0,3376	0,3548	0,3720	0,3893	0,4068	0,4246	0,4429
	1,25	0,2830	0,3005	0,3178	0,3350	0,3523	0,3695	0,3869	0,4045	0,4224	0,4407
	1,30	0,2801	0,2978	0,3152	0,3326	0,3499	0,3673	0,3847	0,4023	0,4203	0,4386
	1,35	0,2773	0,2952	0,3128	0,3302	0,3477	0,3651	0,3826	0,4003	0,4183	0,4366
	1,40	0,2747	0,2928	0,3105	0,3281	0,3456	0,3631	0,3807	0,3984	0,4164	0,4348
	1,45	0,2722	0,2904	0,3083	0,3260	0,3436	0,3612	0,3788	0,3966	0,4146	0,4331
	1,50	0,2698	0,2882	0,3062	0,3240	0,3417	0,3594	0,3771	0,3949	0,4130	0,4315
0,2	1,00	0,3123	0,3294	0,3464	0,3633	0,3803	0,3974	0,4146	0,4320	0,4498	0,4683
	1,05	0,3067	0,3241	0,3413	0,3585	0,3757	0,3929	0,4102	0,4278	0,4457	0,4642
	1,10	0,3012	0,3190	0,3365	0,3539	0,3713	0,3887	0,4061	0,4238	0,4418	0,4604
	1,15	0,2960	0,3141	0,3319	0,3496	0,3671	0,3847	0,4023	0,4201	0,4382	0,4569
	1,20	0,2908	0,3094	0,3276	0,3455	0,3632	0,3809	0,3987	0,4166	0,4348	0,4535
	1,25	0,2858	0,3049	0,3234	0,3415	0,3595	0,3774	0,3953	0,4133	0,4316	0,4504
	1,30	0,2808	0,3005	0,3194	0,3378	0,3560	0,3740	0,3921	0,4102	0,4286	0,4475
	1,35	0,2758	0,2961	0,3155	0,3342	0,3526	0,3708	0,3890	0,4073	0,4258	0,4447
	1,40	0,2707	0,2919	0,3117	0,3307	0,3494	0,3678	0,3861	0,4045	0,4231	0,4421
	1,45	0,2655	0,2877	0,3080	0,3274	0,3463	0,3649	0,3834	0,4019	0,4206	0,4397
	1,50	0,2601	0,2835	0,3044	0,3242	0,3433	0,3621	0,3808	0,3994	0,4182	0,4373
0,25	1,00	0,3279	0,3450	0,3620	0,3789	0,3959	0,4129	0,4300	0,4474	0,4653	0,4817
	1,05	0,3206	0,3382	0,3555	0,3728	0,3900	0,4073	0,4246	0,4422	0,4602	0,4792
	1,10	0,3134	0,3315	0,3493	0,3669	0,3844	0,4019	0,4195	0,4373	0,4554	0,4744
	1,15	0,3061	0,3249	0,3432	0,3612	0,3790	0,3968	0,4146	0,4326	0,4509	0,4699
	1,20	0,2986	0,3184	0,3373	0,3557	0,3739	0,3919	0,4100	0,4281	0,4466	0,4657
	1,25	0,2907	0,3118	0,3314	0,3503	0,3689	0,3872	0,4055	0,4239	0,4425	0,4617
	1,30	0,2822	0,3050	0,3255	0,3451	0,3640	0,3827	0,4012	0,4198	0,4386	0,4579
	1,35	0,2720	0,2979	0,3197	0,3399	0,3593	0,3783	0,3971	0,4159	0,4349	0,4543
	1,40	0,2561	0,2902	0,3137	0,3347	0,3547	0,3741	0,3932	0,4122	0,4313	0,4509
	1,45		0,2814	0,3075	0,3296	0,3502	0,3700	0,3894	0,4086	0,4279	0,4476
	1,50		0,2697	0,3010	0,3244	0,3457	0,3659	0,3857	0,4052	0,4247	0,4445
0,3	1,00	0,3463	0,3630	0,3797	0,3963	0,4129	0,4297	0,4466	0,4638	0,4807	0,4887
	1,05	0,3379	0,3551	0,3722	0,3892	0,4062	0,4232	0,4404	0,4578	0,4758	0,4862
	1,10	0,3293	0,3473	0,3649	0,3823	0,3996	0,4170	0,4344	0,4521	0,4703	0,4839
	1,15	0,3204	0,3393	0,3575	0,3755	0,3932	0,4109	0,4286	0,4466	0,4649	0,4818
	1,20	0,3109	0,3311	0,3502	0,3687	0,3869	0,4050	0,4230	0,4412	0,4598	0,4794
	1,25	0,3001	0,3224	0,3427	0,3619	0,3807	0,3992	0,4176	0,4361	0,4549	0,4745
	1,30	0,2859	0,3129	0,3349	0,3551	0,3746	0,3936	0,4123	0,4311	0,4501	0,4699
	1,35	0,2473	0,3016	0,3266	0,3482	0,3684	0,3880	0,4072	0,4263	0,4456	0,4654
	1,40		0,2840	0,3174	0,3410	0,3623	0,3825	0,4021	0,4216	0,4411	0,4612
	1,45			0,3063	0,3334	0,3560	0,3770	0,3972	0,4170	0,4369	0,4571
	1,50				0,3249	0,3495	0,3715	0,3923	0,4125	0,4327	0,4531

μ_{lu} pour S 500 PH ; f_{ck} = 30 MPa ; α_e = 27

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2897	0,3046	0,3197	0,3350	0,3504	0,3661	0,3820	0,3982	0,4148	0,4318
0,05	1,00	0,2941	0,3097	0,3253	0,3411	0,3571	0,3732	0,3896	0,4062	0,4232	0,4406
	1,05	0,2933	0,3088	0,3244	0,3402	0,3562	0,3724	0,3887	0,4054	0,4224	0,4398
	1,10	0,2925	0,3080	0,3236	0,3394	0,3554	0,3716	0,3880	0,4046	0,4216	0,4391
	1,15	0,2917	0,3072	0,3229	0,3387	0,3547	0,3709	0,3873	0,4039	0,4209	0,4384
	1,20	0,2910	0,3066	0,3222	0,3381	0,3541	0,3702	0,3866	0,4033	0,4203	0,4377
	1,25	0,2904	0,3060	0,3216	0,3375	0,3535	0,3696	0,3860	0,4027	0,4197	0,4372
	1,30	0,2898	0,3054	0,3211	0,3369	0,3529	0,3691	0,3855	0,4022	0,4192	0,4366
	1,35	0,2893	0,3048	0,3205	0,3364	0,3524	0,3686	0,3850	0,4017	0,4187	0,4361
	1,40	0,2888	0,3044	0,3200	0,3359	0,3519	0,3681	0,3845	0,4012	0,4182	0,4357
	1,45	0,2883	0,3039	0,3196	0,3354	0,3514	0,3676	0,3841	0,4007	0,4178	0,4352
	1,50	0,2879	0,3035	0,3192	0,3350	0,3510	0,3672	0,3837	0,4003	0,4174	0,4348
0,1	1,00	0,3001	0,3162	0,3325	0,3488	0,3652	0,3818	0,3986	0,4156	0,4330	0,4509
	1,05	0,2981	0,3143	0,3305	0,3469	0,3634	0,3800	0,3968	0,4138	0,4312	0,4492
	1,10	0,2962	0,3124	0,3287	0,3451	0,3616	0,3783	0,3951	0,4122	0,4296	0,4476
	1,15	0,2945	0,3108	0,3271	0,3435	0,3601	0,3768	0,3936	0,4107	0,4282	0,4461
	1,20	0,2929	0,3092	0,3256	0,3421	0,3586	0,3753	0,3922	0,4094	0,4268	0,4448
	1,25	0,2914	0,3078	0,3242	0,3407	0,3573	0,3740	0,3909	0,4081	0,4256	0,4435
	1,30	0,2900	0,3064	0,3229	0,3394	0,3560	0,3728	0,3897	0,4069	0,4244	0,4424
	1,35	0,2888	0,3052	0,3217	0,3382	0,3549	0,3716	0,3886	0,4058	0,4233	0,4413
	1,40	0,2875	0,3040	0,3205	0,3371	0,3538	0,3706	0,3876	0,4048	0,4223	0,4403
	1,45	0,2864	0,3029	0,3195	0,3361	0,3528	0,3696	0,3866	0,4038	0,4213	0,4393
	1,50	0,2854	0,3019	0,3185	0,3351	0,3518	0,3686	0,3857	0,4029	0,4205	0,4385
0,15	1,00	0,3081	0,3248	0,3416	0,3583	0,3752	0,3921	0,4092	0,4265	0,4442	0,4626
	1,05	0,3046	0,3215	0,3384	0,3553	0,3722	0,3892	0,4064	0,4238	0,4415	0,4599
	1,10	0,3014	0,3184	0,3354	0,3524	0,3694	0,3865	0,4037	0,4212	0,4390	0,4574
	1,15	0,2984	0,3156	0,3327	0,3497	0,3668	0,3840	0,4013	0,4188	0,4367	0,4551
	1,20	0,2955	0,3129	0,3301	0,3472	0,3644	0,3817	0,3990	0,4166	0,4345	0,4530
	1,25	0,2929	0,3103	0,3276	0,3449	0,3622	0,3795	0,3969	0,4146	0,4325	0,4510
	1,30	0,2903	0,3079	0,3254	0,3427	0,3601	0,3774	0,3949	0,4126	0,4306	0,4491
	1,35	0,2879	0,3057	0,3232	0,3407	0,3581	0,3755	0,3931	0,4108	0,4289	0,4474
	1,40	0,2857	0,3035	0,3212	0,3387	0,3562	0,3737	0,3914	0,4092	0,4272	0,4458
	1,45	0,2835	0,3015	0,3193	0,3369	0,3545	0,3721	0,3897	0,4076	0,4257	0,4443
	1,50	0,2814	0,2996	0,3175	0,3352	0,3528	0,3705	0,3882	0,4061	0,4242	0,4428
0,2	1,00	0,3188	0,3360	0,3530	0,3701	0,3871	0,4042	0,4215	0,4390	0,4569	0,4757
	1,05	0,3137	0,3312	0,3485	0,3657	0,3829	0,4002	0,4176	0,4352	0,4532	0,4720
	1,10	0,3088	0,3266	0,3441	0,3616	0,3790	0,3964	0,4139	0,4317	0,4498	0,4686
	1,15	0,3041	0,3222	0,3401	0,3577	0,3753	0,3929	0,4105	0,4284	0,4466	0,4654
	1,20	0,2996	0,3181	0,3362	0,3540	0,3718	0,3895	0,4073	0,4253	0,4436	0,4625
	1,25	0,2951	0,3140	0,3324	0,3505	0,3685	0,3864	0,4043	0,4224	0,4407	0,4597
	1,30	0,2908	0,3102	0,3289	0,3472	0,3653	0,3834	0,4014	0,4196	0,4381	0,4571
	1,35	0,2866	0,3064	0,3255	0,3440	0,3624	0,3805	0,3987	0,4170	0,4356	0,4546
	1,40	0,2823	0,3028	0,3222	0,3410	0,3595	0,3779	0,3962	0,4146	0,4332	0,4523
	1,45	0,2781	0,2992	0,3190	0,3381	0,3568	0,3753	0,3937	0,4122	0,4310	0,4502
	1,50	0,2739	0,2958	0,3160	0,3353	0,3542	0,3729	0,3914	0,4100	0,4289	0,4481
0,25	1,00	0,3326	0,3498	0,3669	0,3840	0,4010	0,4181	0,4353	0,4528	0,4708	0,4841
	1,05	0,3259	0,3436	0,3610	0,3784	0,3957	0,4130	0,4304	0,4481	0,4662	0,4822
	1,10	0,3193	0,3375	0,3554	0,3730	0,3906	0,4082	0,4258	0,4436	0,4619	0,4805
	1,15	0,3126	0,3315	0,3499	0,3679	0,3857	0,4035	0,4214	0,4394	0,4579	0,4772
	1,20	0,3059	0,3256	0,3445	0,3629	0,3811	0,3992	0,4172	0,4354	0,4540	0,4734
	1,25	0,2990	0,3197	0,3392	0,3581	0,3766	0,3949	0,4132	0,4316	0,4503	0,4698
	1,30	0,2917	0,3138	0,3340	0,3534	0,3723	0,3909	0,4094	0,4280	0,4469	0,4664
	1,35	0,2836	0,3077	0,3289	0,3488	0,3681	0,3870	0,4058	0,4246	0,4436	0,4632
	1,40	0,2739	0,3014	0,3238	0,3444	0,3641	0,3833	0,4023	0,4213	0,4404	0,4601
	1,45		0,2946	0,3186	0,3399	0,3601	0,3797	0,3989	0,4181	0,4374	0,4572
	1,50		0,2870	0,3133	0,3355	0,3563	0,3762	0,3957	0,4151	0,4346	0,4545
0,3	1,00	0,3493	0,3662	0,3829	0,3997	0,4164	0,4333	0,4503	0,4676	0,4824	0,4905
	1,05	0,3414	0,3588	0,3760	0,3931	0,4102	0,4273	0,4446	0,4621	0,4801	0,4882
	1,10	0,3333	0,3514	0,3692	0,3867	0,4042	0,4216	0,4391	0,4569	0,4752	0,4861
	1,15	0,3250	0,3440	0,3624	0,3805	0,3983	0,4161	0,4339	0,4519	0,4704	0,4841
	1,20	0,3161	0,3364	0,3557	0,3743	0,3926	0,4107	0,4288	0,4471	0,4658	0,4822
	1,25	0,3062	0,3285	0,3488	0,3682	0,3870	0,4055	0,4239	0,4425	0,4614	0,4805
	1,30	0,2939	0,3200	0,3418	0,3620	0,3814	0,4004	0,4192	0,4380	0,4571	0,4771
	1,35	0,2431	0,3103	0,3345	0,3558	0,3759	0,3954	0,4146	0,4337	0,4530	0,4731
	1,40		0,2977	0,3266	0,3495	0,3705	0,3905	0,4101	0,4295	0,4491	0,4693
	1,45			0,3177	0,3429	0,3650	0,3857	0,4057	0,4255	0,4453	0,4657
	1,50			0,3063	0,3359	0,3594	0,3808	0,4014	0,4215	0,4416	0,4622

μ_{lu} pour S 500 PH ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 6

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1538	0,1637	0,1737	0,1840	0,1946	0,2054	0,2164	0,2276	0,2391	0,2508
0,05	1,00	0,1672	0,1785	0,1900	0,2017	0,2135	0,2256	0,2378	0,2503	0,2629	0,2758
	1,05	0,1648	0,1761	0,1876	0,1993	0,2111	0,2231	0,2354	0,2478	0,2605	0,2733
	1,10	0,1625	0,1739	0,1854	0,1970	0,2089	0,2209	0,2331	0,2456	0,2582	0,2711
	1,15	0,1604	0,1718	0,1833	0,1950	0,2068	0,2189	0,2311	0,2435	0,2561	0,2690
	1,20	0,1585	0,1699	0,1814	0,1931	0,2049	0,2170	0,2292	0,2416	0,2542	0,2671
	1,25	0,1567	0,1681	0,1796	0,1913	0,2032	0,2152	0,2274	0,2398	0,2524	0,2653
	1,30	0,1550	0,1664	0,1780	0,1897	0,2015	0,2136	0,2258	0,2382	0,2508	0,2636
	1,35	0,1534	0,1649	0,1764	0,1881	0,2000	0,2120	0,2242	0,2367	0,2493	0,2621
	1,40	0,1519	0,1634	0,1750	0,1867	0,1986	0,2106	0,2228	0,2352	0,2478	0,2607
	1,45	0,1505	0,1620	0,1736	0,1854	0,1972	0,2093	0,2215	0,2339	0,2465	0,2593
	1,50	0,1492	0,1607	0,1724	0,1841	0,1960	0,2080	0,2202	0,2326	0,2452	0,2581
0,1	1,00	0,1897	0,2023	0,2149	0,2277	0,2405	0,2536	0,2668	0,2801	0,2937	0,3075
	1,05	0,1840	0,1967	0,2095	0,2223	0,2352	0,2483	0,2615	0,2749	0,2885	0,3023
	1,10	0,1785	0,1914	0,2043	0,2172	0,2303	0,2434	0,2567	0,2701	0,2837	0,2975
	1,15	0,1732	0,1864	0,1994	0,2125	0,2256	0,2388	0,2521	0,2655	0,2792	0,2930
	1,20	0,1680	0,1815	0,1947	0,2079	0,2211	0,2344	0,2478	0,2613	0,2750	0,2888
	1,25	0,1629	0,1767	0,1902	0,2036	0,2169	0,2303	0,2437	0,2573	0,2710	0,2849
	1,30	0,1577	0,1721	0,1859	0,1995	0,2129	0,2264	0,2399	0,2535	0,2673	0,2812
	1,35	0,1524	0,1675	0,1817	0,1955	0,2091	0,2227	0,2363	0,2500	0,2638	0,2777
	1,40	0,1467	0,1628	0,1775	0,1916	0,2054	0,2192	0,2329	0,2466	0,2605	0,2745
	1,45	0,1404	0,1581	0,1734	0,1879	0,2019	0,2158	0,2296	0,2434	0,2573	0,2714
	1,50	0,1324	0,1532	0,1694	0,1842	0,1985	0,2125	0,2265	0,2404	0,2544	0,2684
0,15	1,00	0,2210	0,2341	0,2473	0,2606	0,2741	0,2877	0,3015	0,3155	0,3296	0,3440
	1,05	0,2126	0,2259	0,2393	0,2527	0,2663	0,2799	0,2938	0,3078	0,3220	0,3364
	1,10	0,2043	0,2179	0,2315	0,2451	0,2588	0,2726	0,2865	0,3005	0,3148	0,3292
	1,15	0,1960	0,2100	0,2239	0,2377	0,2516	0,2655	0,2795	0,2937	0,3080	0,3225
	1,20	0,1873	0,2021	0,2164	0,2305	0,2446	0,2587	0,2729	0,2871	0,3015	0,3161
	1,25	0,1779	0,1938	0,2089	0,2234	0,2378	0,2521	0,2665	0,2809	0,2953	0,3100
	1,30	0,1667	0,1851	0,2012	0,2164	0,2312	0,2458	0,2603	0,2748	0,2894	0,3042
	1,35	0,1374	0,1750	0,1930	0,2092	0,2245	0,2395	0,2543	0,2690	0,2838	0,2986
	1,40	0,1295	0,1599	0,1840	0,2017	0,2179	0,2333	0,2484	0,2634	0,2783	0,2933
	1,45		0,1281	0,1727	0,1937	0,2110	0,2271	0,2427	0,2579	0,2731	0,2882
	1,50			0,1264	0,1845	0,2039	0,2209	0,2370	0,2526	0,2679	0,2833
0,2	1,00	0,2564	0,2697	0,2832	0,2969	0,3107	0,3246	0,3388	0,3531	0,3677	0,3825
	1,05	0,2465	0,2600	0,2735	0,2872	0,3011	0,3151	0,3293	0,3437	0,3583	0,3731
	1,10	0,2367	0,2503	0,2641	0,2779	0,2919	0,3060	0,3202	0,3346	0,3493	0,3641
	1,15	0,2268	0,2408	0,2548	0,2688	0,2829	0,2971	0,3115	0,3260	0,3406	0,3555
	1,20	0,2165	0,2311	0,2454	0,2598	0,2741	0,2885	0,3030	0,3176	0,3324	0,3474
	1,25	0,2054	0,2209	0,2360	0,2507	0,2654	0,2800	0,2947	0,3095	0,3244	0,3395
	1,30	0,1923	0,2100	0,2261	0,2415	0,2567	0,2717	0,2866	0,3016	0,3167	0,3319
	1,35	0,1784	0,1968	0,2153	0,2319	0,2478	0,2633	0,2786	0,2939	0,3091	0,3245
	1,40	0,1733	0,1790	0,2024	0,2215	0,2386	0,2548	0,2706	0,2862	0,3018	0,3173
	1,45	0,1672	0,1736	0,1796	0,2092	0,2287	0,2460	0,2625	0,2786	0,2945	0,3103
	1,50	0,1565	0,1667	0,1739	0,1879	0,2172	0,2367	0,2542	0,2710	0,2873	0,3034
0,25	1,00	0,2917	0,3054	0,3192	0,3331	0,3472	0,3614	0,3759	0,3905	0,4054	0,4206
	1,05	0,2811	0,2948	0,3086	0,3225	0,3366	0,3509	0,3653	0,3799	0,3948	0,4100
	1,10	0,2707	0,2844	0,2982	0,3122	0,3263	0,3406	0,3551	0,3697	0,3846	0,3998
	1,15	0,2602	0,2740	0,2880	0,3021	0,3163	0,3307	0,3452	0,3599	0,3748	0,3900
	1,20	0,2495	0,2637	0,2778	0,2921	0,3064	0,3209	0,3355	0,3503	0,3653	0,3806
	1,25	0,2384	0,2530	0,2676	0,2821	0,2967	0,3113	0,3261	0,3410	0,3561	0,3714
	1,30	0,2263	0,2418	0,2570	0,2719	0,2869	0,3018	0,3168	0,3319	0,3471	0,3625
	1,35	0,2167	0,2294	0,2457	0,2614	0,2769	0,2922	0,3075	0,3228	0,3383	0,3538
	1,40	0,2119	0,2174	0,2330	0,2502	0,2665	0,2824	0,2982	0,3138	0,3295	0,3453
	1,45	0,2069	0,2126	0,2182	0,2374	0,2553	0,2722	0,2886	0,3048	0,3208	0,3369
	1,50	0,2015	0,2074	0,2132	0,2202	0,2426	0,2613	0,2787	0,2955	0,3121	0,3285
0,3	1,00	0,3251	0,3390	0,3531	0,3674	0,3817	0,3962	0,4110	0,4259	0,4411	0,4567
	1,05	0,3142	0,3281	0,3422	0,3563	0,3707	0,3852	0,3998	0,4147	0,4299	0,4454
	1,10	0,3035	0,3174	0,3314	0,3456	0,3599	0,3744	0,3891	0,4039	0,4191	0,4345
	1,15	0,2929	0,3068	0,3209	0,3350	0,3494	0,3639	0,3785	0,3934	0,4086	0,4240
	1,20	0,2822	0,2962	0,3104	0,3246	0,3390	0,3536	0,3683	0,3832	0,3984	0,4138
	1,25	0,2713	0,2856	0,2998	0,3142	0,3287	0,3434	0,3582	0,3732	0,3884	0,4039
	1,30	0,2600	0,2746	0,2891	0,3038	0,3185	0,3333	0,3482	0,3633	0,3786	0,3942
	1,35	0,2523	0,2630	0,2781	0,2931	0,3081	0,3231	0,3383	0,3536	0,3690	0,3847
	1,40	0,2476	0,2533	0,2663	0,2819	0,2974	0,3129	0,3283	0,3438	0,3595	0,3753
	1,45	0,2428	0,2486	0,2544	0,2700	0,2863	0,3023	0,3181	0,3340	0,3499	0,3660
	1,50	0,2380	0,2437	0,2495	0,2562	0,2741	0,2911	0,3077	0,3240	0,3403	0,3567

μ_{lu} pour S 500 PH ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 9

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,1955	0,2073	0,2193	0,2316	0,2442	0,2569	0,2700	0,2833	0,2968	0,3106
0,05	1,00	0,2055	0,2185	0,2317	0,2451	0,2586	0,2724	0,2864	0,3006	0,3151	0,3298
	1,05	0,2036	0,2166	0,2298	0,2432	0,2568	0,2705	0,2845	0,2987	0,3132	0,3279
	1,10	0,2019	0,2149	0,2281	0,2415	0,2551	0,2688	0,2828	0,2970	0,3115	0,3262
	1,15	0,2003	0,2133	0,2265	0,2399	0,2535	0,2673	0,2812	0,2954	0,3099	0,3246
	1,20	0,1988	0,2119	0,2251	0,2385	0,2520	0,2658	0,2798	0,2940	0,3084	0,3232
	1,25	0,1975	0,2105	0,2237	0,2371	0,2507	0,2645	0,2785	0,2927	0,3071	0,3218
	1,30	0,1962	0,2093	0,2225	0,2359	0,2495	0,2632	0,2772	0,2914	0,3059	0,3206
	1,35	0,1950	0,2081	0,2213	0,2347	0,2483	0,2621	0,2761	0,2903	0,3047	0,3194
	1,40	0,1939	0,2070	0,2202	0,2336	0,2472	0,2610	0,2750	0,2892	0,3036	0,3183
	1,45	0,1929	0,2060	0,2192	0,2326	0,2462	0,2600	0,2740	0,2882	0,3026	0,3173
	1,50	0,1920	0,2050	0,2183	0,2317	0,2453	0,2591	0,2730	0,2872	0,3017	0,3164
0,1	1,00	0,2209	0,2351	0,2493	0,2636	0,2781	0,2927	0,3075	0,3225	0,3378	0,3532
	1,05	0,2164	0,2307	0,2450	0,2595	0,2740	0,2887	0,3035	0,3185	0,3338	0,3493
	1,10	0,2123	0,2267	0,2411	0,2556	0,2702	0,2849	0,2998	0,3148	0,3301	0,3456
	1,15	0,2083	0,2228	0,2374	0,2519	0,2666	0,2814	0,2963	0,3114	0,3267	0,3422
	1,20	0,2046	0,2192	0,2339	0,2485	0,2633	0,2781	0,2930	0,3082	0,3235	0,3390
	1,25	0,2010	0,2158	0,2306	0,2453	0,2601	0,2750	0,2900	0,3052	0,3205	0,3361
	1,30	0,1975	0,2126	0,2275	0,2423	0,2572	0,2721	0,2872	0,3024	0,3178	0,3333
	1,35	0,1943	0,2095	0,2245	0,2395	0,2544	0,2694	0,2845	0,2998	0,3152	0,3308
	1,40	0,1911	0,2066	0,2217	0,2368	0,2518	0,2669	0,2820	0,2973	0,3127	0,3284
	1,45	0,1880	0,2037	0,2191	0,2342	0,2493	0,2645	0,2796	0,2950	0,3104	0,3261
	1,50	0,1850	0,2010	0,2165	0,2318	0,2470	0,2622	0,2774	0,2928	0,3083	0,3240
0,15	1,00	0,2430	0,2578	0,2727	0,2876	0,3027	0,3178	0,3331	0,3487	0,3644	0,3804
	1,05	0,2358	0,2509	0,2660	0,2811	0,2963	0,3115	0,3270	0,3425	0,3583	0,3744
	1,10	0,2288	0,2443	0,2596	0,2749	0,2902	0,3056	0,3211	0,3368	0,3527	0,3688
	1,15	0,2219	0,2378	0,2534	0,2690	0,2845	0,3000	0,3156	0,3314	0,3473	0,3635
	1,20	0,2150	0,2314	0,2475	0,2633	0,2790	0,2947	0,3104	0,3263	0,3423	0,3586
	1,25	0,2079	0,2251	0,2416	0,2578	0,2737	0,2896	0,3055	0,3215	0,3376	0,3539
	1,30	0,2005	0,2188	0,2359	0,2524	0,2686	0,2847	0,3008	0,3169	0,3331	0,3495
	1,35	0,1922	0,2123	0,2302	0,2472	0,2638	0,2801	0,2963	0,3125	0,3289	0,3453
	1,40	0,1821	0,2055	0,2245	0,2421	0,2590	0,2756	0,2920	0,3084	0,3248	0,3414
	1,45		0,1981	0,2187	0,2370	0,2544	0,2712	0,2879	0,3044	0,3210	0,3376
	1,50		0,1891	0,2127	0,2320	0,2498	0,2670	0,2839	0,3006	0,3173	0,3340
0,2	1,00	0,2704	0,2854	0,3005	0,3156	0,3309	0,3463	0,3618	0,3776	0,3936	0,4099
	1,05	0,2613	0,2766	0,2919	0,3072	0,3226	0,3382	0,3539	0,3697	0,3858	0,4022
	1,10	0,2522	0,2679	0,2835	0,2991	0,3147	0,3304	0,3463	0,3622	0,3784	0,3949
	1,15	0,2429	0,2592	0,2752	0,2912	0,3071	0,3230	0,3390	0,3551	0,3714	0,3880
	1,20	0,2331	0,2504	0,2670	0,2834	0,2996	0,3158	0,3320	0,3483	0,3647	0,3814
	1,25	0,2224	0,2412	0,2587	0,2757	0,2923	0,3088	0,3252	0,3417	0,3583	0,3751
	1,30	0,2091	0,2312	0,2502	0,2679	0,2851	0,3019	0,3187	0,3354	0,3522	0,3691
	1,35	0,1776	0,2195	0,2410	0,2600	0,2779	0,2952	0,3123	0,3293	0,3463	0,3634
	1,40	0,1656	0,2002	0,2308	0,2517	0,2706	0,2885	0,3060	0,3233	0,3406	0,3578
	1,45		0,1619	0,2177	0,2428	0,2631	0,2818	0,2999	0,3175	0,3350	0,3525
	1,50			0,1564	0,2324	0,2552	0,2751	0,2937	0,3118	0,3296	0,3473
0,25	1,00	0,3003	0,3152	0,3302	0,3454	0,3607	0,3761	0,3917	0,4076	0,4237	0,4402
	1,05	0,2901	0,3053	0,3205	0,3358	0,3512	0,3668	0,3825	0,3985	0,4147	0,4313
	1,10	0,2799	0,2954	0,3109	0,3264	0,3421	0,3578	0,3737	0,3898	0,4061	0,4227
	1,15	0,2695	0,2855	0,3014	0,3172	0,3331	0,3490	0,3651	0,3813	0,3978	0,4145
	1,20	0,2585	0,2753	0,2917	0,3080	0,3242	0,3405	0,3568	0,3732	0,3898	0,4067
	1,25	0,2464	0,2645	0,2819	0,2987	0,3154	0,3320	0,3486	0,3653	0,3821	0,3991
	1,30	0,2314	0,2526	0,2715	0,2893	0,3066	0,3236	0,3406	0,3575	0,3745	0,3918
	1,35	0,2162	0,2379	0,2600	0,2793	0,2975	0,3152	0,3326	0,3499	0,3672	0,3846
	1,40	0,2097	0,2171	0,2460	0,2684	0,2881	0,3066	0,3246	0,3423	0,3600	0,3777
	1,45	0,2004	0,2101	0,2181	0,2556	0,2779	0,2978	0,3166	0,3348	0,3529	0,3709
	1,50		0,1979	0,2104	0,2348	0,2663	0,2884	0,3083	0,3273	0,3458	0,3642
0,3	1,00	0,3300	0,3448	0,3598	0,3749	0,3901	0,4055	0,4211	0,4370	0,4531	0,4699
	1,05	0,3195	0,3344	0,3495	0,3647	0,3801	0,3956	0,4113	0,4272	0,4435	0,4602
	1,10	0,3089	0,3241	0,3394	0,3548	0,3702	0,3859	0,4017	0,4178	0,4341	0,4509
	1,15	0,2982	0,3137	0,3293	0,3449	0,3606	0,3764	0,3924	0,4085	0,4250	0,4419
	1,20	0,2871	0,3031	0,3190	0,3350	0,3509	0,3670	0,3832	0,3995	0,4162	0,4331
	1,25	0,2752	0,2920	0,3086	0,3250	0,3413	0,3577	0,3741	0,3907	0,4075	0,4246
	1,30	0,2617	0,2801	0,2976	0,3147	0,3316	0,3484	0,3651	0,3820	0,3990	0,4163
	1,35	0,2519	0,2663	0,2857	0,3039	0,3216	0,3389	0,3562	0,3734	0,3907	0,4082
	1,40	0,2463	0,2530	0,2718	0,2922	0,3111	0,3292	0,3471	0,3647	0,3824	0,4002
	1,45	0,2401	0,2472	0,2542	0,2784	0,2997	0,3191	0,3378	0,3560	0,3741	0,3923
	1,50	0,2325	0,2406	0,2482	0,2578	0,2864	0,3081	0,3281	0,3471	0,3658	0,3844

μ_{lu} pour S 500 PH ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 12

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2258	0,2388	0,2521	0,2656	0,2793	0,2933	0,3075	0,3220	0,3368	0,3518
0,05	1,00	0,2338	0,2478	0,2620	0,2764	0,2910	0,3058	0,3208	0,3360	0,3515	0,3673
	1,05	0,2323	0,2463	0,2605	0,2749	0,2895	0,3043	0,3193	0,3345	0,3500	0,3658
	1,10	0,2309	0,2449	0,2591	0,2735	0,2881	0,3029	0,3179	0,3331	0,3486	0,3644
	1,15	0,2296	0,2436	0,2578	0,2722	0,2868	0,3016	0,3166	0,3319	0,3474	0,3632
	1,20	0,2284	0,2425	0,2567	0,2711	0,2857	0,3005	0,3155	0,3307	0,3462	0,3620
	1,25	0,2273	0,2414	0,2556	0,2700	0,2846	0,2994	0,3144	0,3296	0,3452	0,3610
	1,30	0,2263	0,2404	0,2546	0,2690	0,2836	0,2984	0,3134	0,3287	0,3442	0,3600
	1,35	0,2254	0,2394	0,2537	0,2681	0,2827	0,2975	0,3125	0,3277	0,3432	0,3590
	1,40	0,2245	0,2386	0,2528	0,2672	0,2818	0,2966	0,3116	0,3269	0,3424	0,3582
	1,45	0,2237	0,2377	0,2520	0,2664	0,2810	0,2958	0,3108	0,3261	0,3416	0,3574
	1,50	0,2229	0,2370	0,2512	0,2656	0,2803	0,2951	0,3101	0,3253	0,3408	0,3566
0,1	1,00	0,2454	0,2605	0,2756	0,2908	0,3062	0,3217	0,3374	0,3533	0,3694	0,3859
	1,05	0,2418	0,2570	0,2722	0,2874	0,3028	0,3184	0,3341	0,3500	0,3662	0,3827
	1,10	0,2385	0,2537	0,2690	0,2843	0,2998	0,3154	0,3311	0,3471	0,3633	0,3798
	1,15	0,2354	0,2507	0,2660	0,2814	0,2969	0,3126	0,3283	0,3443	0,3606	0,3771
	1,20	0,2325	0,2479	0,2633	0,2787	0,2943	0,3099	0,3258	0,3418	0,3580	0,3746
	1,25	0,2297	0,2452	0,2607	0,2762	0,2918	0,3075	0,3234	0,3394	0,3557	0,3722
	1,30	0,2271	0,2427	0,2583	0,2738	0,2895	0,3053	0,3212	0,3372	0,3535	0,3701
	1,35	0,2247	0,2404	0,2560	0,2716	0,2873	0,3031	0,3191	0,3352	0,3515	0,3681
	1,40	0,2223	0,2381	0,2539	0,2696	0,2853	0,3011	0,3171	0,3332	0,3496	0,3662
	1,45	0,2201	0,2360	0,2518	0,2676	0,2834	0,2993	0,3153	0,3314	0,3478	0,3644
	1,50	0,2180	0,2340	0,2499	0,2657	0,2816	0,2975	0,3135	0,3297	0,3461	0,3627
0,15	1,00	0,2619	0,2777	0,2935	0,3093	0,3252	0,3412	0,3574	0,3737	0,3903	0,4072
	1,05	0,2560	0,2720	0,2879	0,3039	0,3199	0,3360	0,3523	0,3687	0,3854	0,4024
	1,10	0,2502	0,2665	0,2827	0,2988	0,3150	0,3312	0,3476	0,3641	0,3808	0,3978
	1,15	0,2446	0,2613	0,2777	0,2940	0,3103	0,3267	0,3431	0,3597	0,3766	0,3936
	1,20	0,2392	0,2562	0,2729	0,2894	0,3059	0,3224	0,3390	0,3557	0,3726	0,3897
	1,25	0,2339	0,2514	0,2684	0,2851	0,3017	0,3184	0,3351	0,3518	0,3688	0,3860
	1,30	0,2286	0,2466	0,2640	0,2810	0,2978	0,3146	0,3313	0,3482	0,3653	0,3825
	1,35	0,2233	0,2420	0,2597	0,2770	0,2940	0,3109	0,3278	0,3448	0,3619	0,3793
	1,40	0,2179	0,2374	0,2556	0,2731	0,2904	0,3075	0,3245	0,3416	0,3588	0,3762
	1,45	0,2123	0,2328	0,2516	0,2695	0,2869	0,3042	0,3213	0,3385	0,3558	0,3733
	1,50	0,2062	0,2283	0,2476	0,2659	0,2836	0,3010	0,3183	0,3356	0,3530	0,3705
0,2	1,00	0,2835	0,2995	0,3155	0,3315	0,3476	0,3638	0,3802	0,3967	0,4136	0,4308
	1,05	0,2753	0,2917	0,3080	0,3243	0,3406	0,3570	0,3735	0,3902	0,4071	0,4244
	1,10	0,2673	0,2841	0,3008	0,3173	0,3339	0,3505	0,3671	0,3840	0,4010	0,4184
	1,15	0,2592	0,2766	0,2937	0,3106	0,3274	0,3442	0,3611	0,3781	0,3953	0,4128
	1,20	0,2508	0,2692	0,2868	0,3041	0,3213	0,3383	0,3554	0,3725	0,3898	0,4074
	1,25	0,2419	0,2616	0,2800	0,2978	0,3152	0,3326	0,3499	0,3672	0,3847	0,4024
	1,30	0,2320	0,2537	0,2731	0,2915	0,3094	0,3270	0,3446	0,3621	0,3797	0,3976
	1,35	0,2191	0,2452	0,2661	0,2853	0,3037	0,3217	0,3395	0,3572	0,3750	0,3930
	1,40		0,2356	0,2588	0,2790	0,2980	0,3164	0,3345	0,3525	0,3705	0,3886
	1,45		0,2226	0,2510	0,2727	0,2925	0,3113	0,3298	0,3480	0,3662	0,3844
	1,50			0,2422	0,2662	0,2869	0,3063	0,3251	0,3436	0,3620	0,3804
0,25	1,00	0,3084	0,3243	0,3402	0,3561	0,3722	0,3883	0,4047	0,4212	0,4381	0,4555
	1,05	0,2990	0,3152	0,3314	0,3476	0,3639	0,3802	0,3967	0,4135	0,4305	0,4480
	1,10	0,2894	0,3061	0,3227	0,3393	0,3558	0,3724	0,3891	0,4060	0,4232	0,4408
	1,15	0,2795	0,2970	0,3141	0,3311	0,3480	0,3648	0,3818	0,3989	0,4162	0,4339
	1,20	0,2691	0,2876	0,3055	0,3230	0,3403	0,3575	0,3747	0,3920	0,4095	0,4274
	1,25	0,2573	0,2777	0,2966	0,3148	0,3326	0,3502	0,3678	0,3854	0,4031	0,4211
	1,30	0,2419	0,2668	0,2874	0,3066	0,3250	0,3431	0,3610	0,3789	0,3969	0,4151
	1,35	0,2153	0,2533	0,2774	0,2981	0,3174	0,3361	0,3544	0,3726	0,3908	0,4092
	1,40	0,2024	0,2164	0,2658	0,2890	0,3096	0,3290	0,3479	0,3665	0,3850	0,4036
	1,45		0,1983	0,2491	0,2790	0,3015	0,3219	0,3414	0,3604	0,3793	0,3982
	1,50			0,1912	0,2668	0,2928	0,3146	0,3349	0,3545	0,3737	0,3929
0,3	1,00	0,3346	0,3502	0,3658	0,3816	0,3974	0,4134	0,4295	0,4460	0,4628	0,4802
	1,05	0,3246	0,3405	0,3563	0,3723	0,3883	0,4045	0,4209	0,4375	0,4545	0,4721
	1,10	0,3144	0,3307	0,3469	0,3632	0,3795	0,3959	0,4124	0,4292	0,4464	0,4641
	1,15	0,3039	0,3208	0,3375	0,3541	0,3707	0,3874	0,4042	0,4212	0,4385	0,4563
	1,20	0,2928	0,3105	0,3278	0,3450	0,3620	0,3791	0,3962	0,4134	0,4309	0,4489
	1,25	0,2803	0,2996	0,3179	0,3358	0,3533	0,3708	0,3882	0,4058	0,4235	0,4416
	1,30	0,2646	0,2874	0,3074	0,3262	0,3445	0,3625	0,3804	0,3983	0,4163	0,4346
	1,35	0,2514	0,2720	0,2956	0,3162	0,3355	0,3542	0,3726	0,3908	0,4092	0,4278
	1,40	0,2442	0,2526	0,2812	0,3051	0,3260	0,3456	0,3647	0,3835	0,4022	0,4211
	1,45	0,2331	0,2449	0,2540	0,2919	0,3157	0,3368	0,3567	0,3761	0,3953	0,4145
	1,50		0,2282	0,2455	0,2703	0,3039	0,3274	0,3486	0,3687	0,3884	0,4080

μ_{lu} pour S 500 PH ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 15

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2488	0,2626	0,2766	0,2909	0,3054	0,3201	0,3350	0,3503	0,3658	0,3817
0,05	1,00	0,2554	0,2700	0,2849	0,2999	0,3151	0,3305	0,3461	0,3620	0,3781	0,3946
	1,05	0,2541	0,2688	0,2836	0,2986	0,3138	0,3292	0,3449	0,3607	0,3769	0,3934
	1,10	0,2529	0,2676	0,2825	0,2975	0,3127	0,3281	0,3437	0,3596	0,3758	0,3922
	1,15	0,2519	0,2665	0,2814	0,2964	0,3116	0,3270	0,3427	0,3586	0,3747	0,3912
	1,20	0,2509	0,2656	0,2804	0,2955	0,3107	0,3261	0,3417	0,3576	0,3738	0,3902
	1,25	0,2500	0,2647	0,2795	0,2946	0,3098	0,3252	0,3408	0,3567	0,3729	0,3894
	1,30	0,2491	0,2638	0,2787	0,2937	0,3089	0,3244	0,3400	0,3559	0,3721	0,3886
	1,35	0,2483	0,2630	0,2779	0,2930	0,3082	0,3236	0,3393	0,3551	0,3713	0,3878
	1,40	0,2476	0,2623	0,2772	0,2922	0,3075	0,3229	0,3385	0,3544	0,3706	0,3871
	1,45	0,2469	0,2616	0,2765	0,2916	0,3068	0,3222	0,3379	0,3538	0,3699	0,3864
	1,50	0,2463	0,2610	0,2759	0,2909	0,3062	0,3216	0,3373	0,3532	0,3693	0,3858
0,1	1,00	0,2647	0,2802	0,2959	0,3116	0,3275	0,3435	0,3597	0,3761	0,3928	0,4099
	1,05	0,2617	0,2773	0,2930	0,3088	0,3247	0,3408	0,3570	0,3735	0,3902	0,4073
	1,10	0,2590	0,2746	0,2904	0,3062	0,3222	0,3383	0,3545	0,3710	0,3878	0,4049
	1,15	0,2564	0,2721	0,2879	0,3038	0,3198	0,3360	0,3523	0,3688	0,3855	0,4026
	1,20	0,2540	0,2698	0,2857	0,3016	0,3176	0,3338	0,3501	0,3667	0,3835	0,4006
	1,25	0,2518	0,2676	0,2836	0,2995	0,3156	0,3318	0,3482	0,3647	0,3816	0,3987
	1,30	0,2497	0,2656	0,2816	0,2976	0,3137	0,3300	0,3463	0,3629	0,3798	0,3969
	1,35	0,2477	0,2637	0,2797	0,2958	0,3120	0,3282	0,3446	0,3613	0,3781	0,3953
	1,40	0,2458	0,2619	0,2780	0,2941	0,3103	0,3266	0,3430	0,3597	0,3766	0,3937
	1,45	0,2441	0,2602	0,2764	0,2925	0,3087	0,3251	0,3415	0,3582	0,3751	0,3923
	1,50	0,2424	0,2586	0,2748	0,2910	0,3073	0,3236	0,3401	0,3568	0,3737	0,3909
0,15	1,00	0,2777	0,2940	0,3102	0,3265	0,3429	0,3594	0,3760	0,3928	0,4099	0,4274
	1,05	0,2726	0,2891	0,3056	0,3220	0,3385	0,3550	0,3718	0,3887	0,4058	0,4234
	1,10	0,2678	0,2846	0,3012	0,3177	0,3343	0,3510	0,3678	0,3848	0,4021	0,4196
	1,15	0,2633	0,2802	0,2970	0,3137	0,3305	0,3473	0,3642	0,3812	0,3985	0,4162
	1,20	0,2589	0,2761	0,2931	0,3100	0,3268	0,3437	0,3607	0,3779	0,3952	0,4129
	1,25	0,2546	0,2722	0,2894	0,3064	0,3234	0,3404	0,3575	0,3747	0,3922	0,4099
	1,30	0,2505	0,2684	0,2858	0,3031	0,3202	0,3373	0,3545	0,3718	0,3893	0,4071
	1,35	0,2466	0,2648	0,2825	0,2999	0,3171	0,3344	0,3516	0,3690	0,3866	0,4044
	1,40	0,2427	0,2613	0,2792	0,2968	0,3142	0,3316	0,3489	0,3664	0,3840	0,4019
	1,45	0,2388	0,2579	0,2761	0,2939	0,3115	0,3289	0,3464	0,3639	0,3816	0,3995
	1,50	0,2351	0,2546	0,2732	0,2911	0,3089	0,3264	0,3440	0,3616	0,3793	0,3973
0,2	1,00	0,2950	0,3116	0,3281	0,3446	0,3612	0,3779	0,3947	0,4117	0,4291	0,4468
	1,05	0,2878	0,3048	0,3216	0,3384	0,3552	0,3721	0,3890	0,4062	0,4236	0,4415
	1,10	0,2808	0,2983	0,3154	0,3325	0,3495	0,3665	0,3837	0,4010	0,4185	0,4365
	1,15	0,2739	0,2919	0,3094	0,3268	0,3441	0,3613	0,3786	0,3961	0,4137	0,4318
	1,20	0,2669	0,2856	0,3036	0,3213	0,3389	0,3563	0,3738	0,3914	0,4092	0,4273
	1,25	0,2598	0,2793	0,2979	0,3160	0,3339	0,3516	0,3692	0,3870	0,4049	0,4231
	1,30	0,2523	0,2731	0,2924	0,3109	0,3291	0,3470	0,3649	0,3828	0,4008	0,4192
	1,35	0,2441	0,2667	0,2868	0,3059	0,3244	0,3426	0,3607	0,3788	0,3970	0,4154
	1,40	0,2344	0,2601	0,2813	0,3010	0,3199	0,3384	0,3567	0,3750	0,3933	0,4119
	1,45		0,2530	0,2757	0,2962	0,3155	0,3343	0,3529	0,3713	0,3898	0,4085
	1,50		0,2450	0,2700	0,2914	0,3112	0,3304	0,3492	0,3678	0,3865	0,4052
0,25	1,00	0,3159	0,3324	0,3488	0,3653	0,3818	0,3984	0,4152	0,4322	0,4496	0,4676
	1,05	0,3072	0,3242	0,3410	0,3577	0,3745	0,3914	0,4083	0,4255	0,4431	0,4612
	1,10	0,2985	0,3160	0,3333	0,3504	0,3675	0,3846	0,4018	0,4192	0,4368	0,4550
	1,15	0,2895	0,3078	0,3256	0,3432	0,3606	0,3780	0,3955	0,4131	0,4309	0,4492
	1,20	0,2800	0,2995	0,3180	0,3361	0,3540	0,3717	0,3894	0,4072	0,4252	0,4437
	1,25	0,2695	0,2908	0,3104	0,3291	0,3474	0,3655	0,3835	0,4016	0,4198	0,4384
	1,30	0,2567	0,2815	0,3025	0,3221	0,3410	0,3595	0,3779	0,3962	0,4146	0,4334
	1,35	0,2136	0,2708	0,2943	0,3150	0,3346	0,3536	0,3723	0,3909	0,4096	0,4285
	1,40		0,2563	0,2853	0,3077	0,3282	0,3478	0,3669	0,3859	0,4048	0,4239
	1,45			0,2748	0,3001	0,3218	0,3421	0,3617	0,3809	0,4001	0,4194
	1,50			0,2597	0,2918	0,3152	0,3363	0,3565	0,3761	0,3956	0,4151
0,3	1,00	0,3390	0,3551	0,3712	0,3874	0,4036	0,4200	0,4365	0,4534	0,4707	0,4838
	1,05	0,3295	0,3460	0,3625	0,3790	0,3955	0,4121	0,4289	0,4459	0,4634	0,4807
	1,10	0,3199	0,3369	0,3538	0,3707	0,3875	0,4044	0,4214	0,4387	0,4563	0,4747
	1,15	0,3098	0,3276	0,3451	0,3624	0,3797	0,3969	0,4142	0,4317	0,4495	0,4680
	1,20	0,2990	0,3180	0,3363	0,3542	0,3719	0,3895	0,4071	0,4249	0,4430	0,4616
	1,25	0,2866	0,3077	0,3272	0,3459	0,3642	0,3822	0,4002	0,4183	0,4366	0,4554
	1,30	0,2698	0,2960	0,3175	0,3373	0,3564	0,3750	0,3934	0,4118	0,4304	0,4494
	1,35	0,2506	0,2811	0,3068	0,3284	0,3484	0,3678	0,3867	0,4055	0,4244	0,4436
	1,40	0,2392	0,2520	0,2939	0,3187	0,3402	0,3604	0,3800	0,3993	0,4185	0,4380
	1,45		0,2374	0,2683	0,3076	0,3316	0,3530	0,3733	0,3931	0,4127	0,4325
	1,50			0,2346	0,2929	0,3221	0,3452	0,3665	0,3870	0,4070	0,4271

μ_{lu} pour S 500 PH ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 18

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2667	0,2810	0,2956	0,3104	0,3253	0,3405	0,3560	0,3717	0,3877	0,4041
0,05	1,00	0,2723	0,2874	0,3027	0,3181	0,3337	0,3494	0,3655	0,3817	0,3983	0,4152
	1,05	0,2712	0,2863	0,3016	0,3170	0,3326	0,3484	0,3644	0,3807	0,3972	0,4142
	1,10	0,2702	0,2853	0,3006	0,3160	0,3316	0,3474	0,3634	0,3797	0,3963	0,4132
	1,15	0,2693	0,2844	0,2997	0,3151	0,3307	0,3465	0,3625	0,3788	0,3954	0,4123
	1,20	0,2685	0,2836	0,2988	0,3143	0,3299	0,3457	0,3617	0,3780	0,3946	0,4115
	1,25	0,2677	0,2828	0,2981	0,3135	0,3291	0,3449	0,3610	0,3772	0,3938	0,4108
	1,30	0,2670	0,2821	0,2974	0,3128	0,3284	0,3442	0,3603	0,3766	0,3931	0,4101
	1,35	0,2663	0,2814	0,2967	0,3121	0,3278	0,3436	0,3596	0,3759	0,3925	0,4094
	1,40	0,2657	0,2808	0,2961	0,3115	0,3272	0,3430	0,3590	0,3753	0,3919	0,4089
	1,45	0,2651	0,2802	0,2955	0,3110	0,3266	0,3424	0,3585	0,3748	0,3913	0,4083
	1,50	0,2645	0,2797	0,2950	0,3104	0,3261	0,3419	0,3579	0,3742	0,3908	0,4078
0,1	1,00	0,2801	0,2959	0,3119	0,3279	0,3441	0,3604	0,3769	0,3937	0,4107	0,4282
	1,05	0,2775	0,2934	0,3094	0,3255	0,3417	0,3581	0,3746	0,3914	0,4085	0,4260
	1,10	0,2752	0,2911	0,3072	0,3233	0,3396	0,3560	0,3726	0,3894	0,4064	0,4239
	1,15	0,2730	0,2890	0,3051	0,3213	0,3376	0,3540	0,3706	0,3874	0,4046	0,4221
	1,20	0,2710	0,2871	0,3032	0,3194	0,3357	0,3522	0,3688	0,3857	0,4028	0,4203
	1,25	0,2691	0,2852	0,3014	0,3177	0,3340	0,3505	0,3672	0,3840	0,4012	0,4187
	1,30	0,2673	0,2835	0,2997	0,3160	0,3324	0,3489	0,3656	0,3825	0,3997	0,4172
	1,35	0,2657	0,2819	0,2982	0,3145	0,3309	0,3475	0,3642	0,3811	0,3983	0,4159
	1,40	0,2641	0,2804	0,2967	0,3131	0,3295	0,3461	0,3628	0,3798	0,3970	0,4146
	1,45	0,2627	0,2790	0,2954	0,3118	0,3282	0,3448	0,3616	0,3785	0,3958	0,4133
	1,50	0,2613	0,2777	0,2941	0,3105	0,3270	0,3436	0,3604	0,3774	0,3946	0,4122
0,15	1,00	0,2907	0,3072	0,3238	0,3403	0,3570	0,3737	0,3906	0,4077	0,4251	0,4430
	1,05	0,2864	0,3031	0,3198	0,3364	0,3532	0,3700	0,3870	0,4042	0,4216	0,4396
	1,10	0,2823	0,2992	0,3160	0,3328	0,3497	0,3666	0,3836	0,4009	0,4184	0,4364
	1,15	0,2784	0,2955	0,3125	0,3294	0,3464	0,3634	0,3805	0,3979	0,4155	0,4335
	1,20	0,2747	0,2921	0,3092	0,3263	0,3433	0,3604	0,3776	0,3950	0,4127	0,4307
	1,25	0,2712	0,2888	0,3061	0,3233	0,3404	0,3576	0,3749	0,3924	0,4101	0,4282
	1,30	0,2679	0,2857	0,3031	0,3205	0,3377	0,3550	0,3724	0,3899	0,4077	0,4258
	1,35	0,2647	0,2827	0,3003	0,3178	0,3352	0,3525	0,3700	0,3876	0,4054	0,4236
	1,40	0,2616	0,2799	0,2977	0,3153	0,3328	0,3502	0,3677	0,3854	0,4033	0,4215
	1,45	0,2587	0,2772	0,2952	0,3129	0,3305	0,3480	0,3656	0,3833	0,4013	0,4195
	1,50	0,2558	0,2746	0,2927	0,3106	0,3283	0,3460	0,3636	0,3814	0,3994	0,4176
0,2	1,00	0,3049	0,3218	0,3387	0,3555	0,3723	0,3893	0,4064	0,4236	0,4413	0,4595
	1,05	0,2986	0,3159	0,3330	0,3501	0,3671	0,3842	0,4015	0,4189	0,4366	0,4549
	1,10	0,2926	0,3102	0,3277	0,3450	0,3622	0,3795	0,3969	0,4144	0,4323	0,4506
	1,15	0,2866	0,3047	0,3225	0,3401	0,3575	0,3750	0,3925	0,4102	0,4282	0,4466
	1,20	0,2807	0,2994	0,3176	0,3354	0,3531	0,3708	0,3884	0,4063	0,4243	0,4428
	1,25	0,2749	0,2942	0,3128	0,3309	0,3489	0,3667	0,3846	0,4025	0,4207	0,4393
	1,30	0,2689	0,2891	0,3081	0,3266	0,3448	0,3629	0,3809	0,3990	0,4173	0,4360
	1,35	0,2629	0,2840	0,3036	0,3225	0,3410	0,3592	0,3774	0,3957	0,4141	0,4328
	1,40	0,2565	0,2789	0,2992	0,3185	0,3372	0,3557	0,3741	0,3925	0,4110	0,4298
	1,45	0,2495	0,2737	0,2948	0,3146	0,3337	0,3524	0,3709	0,3894	0,4081	0,4270
	1,50	0,2413	0,2685	0,2905	0,3108	0,3302	0,3492	0,3679	0,3865	0,4053	0,4243
0,25	1,00	0,3227	0,3396	0,3564	0,3731	0,3899	0,4068	0,4238	0,4411	0,4588	0,4774
	1,05	0,3148	0,3321	0,3493	0,3664	0,3835	0,4006	0,4178	0,4353	0,4531	0,4717
	1,10	0,3069	0,3248	0,3424	0,3599	0,3773	0,3946	0,4121	0,4298	0,4477	0,4664
	1,15	0,2988	0,3175	0,3357	0,3536	0,3713	0,3889	0,4066	0,4245	0,4426	0,4614
	1,20	0,2905	0,3102	0,3291	0,3474	0,3655	0,3834	0,4014	0,4195	0,4378	0,4566
	1,25	0,2815	0,3027	0,3224	0,3414	0,3599	0,3781	0,3964	0,4146	0,4331	0,4521
	1,30	0,2712	0,2949	0,3157	0,3354	0,3544	0,3730	0,3915	0,4100	0,4287	0,4478
	1,35	0,2572	0,2864	0,3089	0,3294	0,3490	0,3680	0,3868	0,4056	0,4245	0,4437
	1,40		0,2767	0,3018	0,3234	0,3437	0,3632	0,3823	0,4013	0,4204	0,4398
	1,45		0,2633	0,2942	0,3174	0,3384	0,3584	0,3779	0,3972	0,4165	0,4361
	1,50			0,2856	0,3111	0,3331	0,3537	0,3737	0,3932	0,4128	0,4325
0,3	1,00	0,3431	0,3596	0,3760	0,3925	0,4090	0,4256	0,4424	0,4594	0,4771	0,4867
	1,05	0,3342	0,3511	0,3680	0,3848	0,4016	0,4185	0,4355	0,4528	0,4706	0,4840
	1,10	0,3251	0,3427	0,3600	0,3773	0,3944	0,4116	0,4289	0,4465	0,4644	0,4814
	1,15	0,3156	0,3341	0,3521	0,3698	0,3874	0,4049	0,4225	0,4403	0,4585	0,4776
	1,20	0,3054	0,3252	0,3441	0,3624	0,3805	0,3984	0,4163	0,4344	0,4528	0,4719
	1,25	0,2937	0,3158	0,3359	0,3550	0,3736	0,3920	0,4103	0,4287	0,4473	0,4665
	1,30	0,2778	0,3052	0,3272	0,3474	0,3668	0,3857	0,4044	0,4231	0,4419	0,4614
	1,35	0,2493	0,2922	0,3179	0,3396	0,3599	0,3794	0,3986	0,4176	0,4368	0,4564
	1,40		0,2510	0,3071	0,3314	0,3529	0,3732	0,3929	0,4123	0,4318	0,4516
	1,45			0,2923	0,3223	0,3456	0,3669	0,3872	0,4071	0,4269	0,4469
	1,50				0,3118	0,3379	0,3605	0,3815	0,4019	0,4221	0,4424

μ_{lu} pour S 500 PH ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 21

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2811	0,2958	0,3107	0,3258	0,3411	0,3566	0,3724	0,3884	0,4048	0,4215
0,05	1,00	0,2860	0,3013	0,3168	0,3325	0,3483	0,3644	0,3806	0,3971	0,4140	0,4312
	1,05	0,2850	0,3004	0,3159	0,3316	0,3474	0,3634	0,3797	0,3962	0,4131	0,4303
	1,10	0,2841	0,2995	0,3150	0,3307	0,3466	0,3626	0,3789	0,3954	0,4122	0,4295
	1,15	0,2833	0,2987	0,3142	0,3299	0,3458	0,3618	0,3781	0,3946	0,4115	0,4288
	1,20	0,2826	0,2980	0,3135	0,3292	0,3451	0,3611	0,3774	0,3939	0,4108	0,4281
	1,25	0,2819	0,2973	0,3128	0,3285	0,3444	0,3605	0,3767	0,3933	0,4101	0,4274
	1,30	0,2813	0,2967	0,3122	0,3279	0,3438	0,3599	0,3761	0,3927	0,4095	0,4268
	1,35	0,2807	0,2961	0,3116	0,3273	0,3432	0,3593	0,3756	0,3921	0,4090	0,4263
	1,40	0,2801	0,2955	0,3111	0,3268	0,3427	0,3588	0,3751	0,3916	0,4085	0,4257
	1,45	0,2796	0,2950	0,3106	0,3263	0,3422	0,3583	0,3746	0,3911	0,4080	0,4253
	1,50	0,2791	0,2946	0,3101	0,3258	0,3417	0,3578	0,3741	0,3907	0,4075	0,4248
0,1	1,00	0,2925	0,3086	0,3247	0,3410	0,3573	0,3738	0,3905	0,4075	0,4247	0,4425
	1,05	0,2903	0,3064	0,3226	0,3389	0,3553	0,3718	0,3886	0,4055	0,4228	0,4406
	1,10	0,2883	0,3044	0,3207	0,3370	0,3534	0,3700	0,3867	0,4037	0,4211	0,4388
	1,15	0,2864	0,3026	0,3189	0,3352	0,3517	0,3683	0,3851	0,4021	0,4194	0,4372
	1,20	0,2847	0,3009	0,3172	0,3336	0,3501	0,3667	0,3835	0,4006	0,4179	0,4357
	1,25	0,2830	0,2993	0,3157	0,3321	0,3486	0,3653	0,3821	0,3992	0,4165	0,4343
	1,30	0,2815	0,2979	0,3142	0,3307	0,3472	0,3639	0,3808	0,3979	0,4153	0,4331
	1,35	0,2801	0,2965	0,3129	0,3294	0,3459	0,3627	0,3795	0,3966	0,4141	0,4319
	1,40	0,2788	0,2952	0,3116	0,3281	0,3447	0,3615	0,3784	0,3955	0,4129	0,4308
	1,45	0,2775	0,2940	0,3105	0,3270	0,3436	0,3604	0,3773	0,3944	0,4119	0,4297
	1,50	0,2764	0,2928	0,3094	0,3259	0,3426	0,3593	0,3763	0,3935	0,4109	0,4288
0,15	1,00	0,3015	0,3182	0,3348	0,3516	0,3683	0,3852	0,4022	0,4195	0,4371	0,4553
	1,05	0,2977	0,3146	0,3314	0,3482	0,3650	0,3820	0,3991	0,4165	0,4341	0,4523
	1,10	0,2942	0,3112	0,3281	0,3450	0,3620	0,3790	0,3962	0,4136	0,4314	0,4496
	1,15	0,2908	0,3080	0,3251	0,3421	0,3592	0,3763	0,3936	0,4110	0,4288	0,4471
	1,20	0,2877	0,3050	0,3222	0,3394	0,3565	0,3737	0,3911	0,4086	0,4264	0,4447
	1,25	0,2847	0,3022	0,3195	0,3368	0,3540	0,3713	0,3887	0,4063	0,4242	0,4425
	1,30	0,2819	0,2996	0,3170	0,3344	0,3517	0,3691	0,3865	0,4042	0,4221	0,4405
	1,35	0,2792	0,2971	0,3146	0,3321	0,3495	0,3670	0,3845	0,4022	0,4202	0,4386
	1,40	0,2767	0,2947	0,3124	0,3300	0,3475	0,3650	0,3826	0,4003	0,4183	0,4368
	1,45	0,2742	0,2924	0,3103	0,3279	0,3455	0,3631	0,3808	0,3986	0,4166	0,4351
	1,50	0,2719	0,2903	0,3083	0,3260	0,3437	0,3613	0,3791	0,3969	0,4150	0,4335
0,2	1,00	0,3134	0,3305	0,3476	0,3645	0,3815	0,3986	0,4158	0,4332	0,4511	0,4696
	1,05	0,3079	0,3253	0,3426	0,3598	0,3769	0,3942	0,4115	0,4291	0,4470	0,4656
	1,10	0,3026	0,3203	0,3379	0,3553	0,3726	0,3900	0,4075	0,4252	0,4432	0,4619
	1,15	0,2974	0,3156	0,3334	0,3510	0,3686	0,3861	0,4038	0,4216	0,4397	0,4584
	1,20	0,2924	0,3110	0,3291	0,3470	0,3647	0,3825	0,4002	0,4182	0,4364	0,4551
	1,25	0,2874	0,3065	0,3250	0,3431	0,3611	0,3790	0,3969	0,4150	0,4333	0,4521
	1,30	0,2826	0,3022	0,3210	0,3395	0,3576	0,3757	0,3938	0,4119	0,4303	0,4492
	1,35	0,2777	0,2980	0,3172	0,3359	0,3543	0,3726	0,3908	0,4091	0,4276	0,4465
	1,40	0,2728	0,2939	0,3136	0,3326	0,3512	0,3696	0,3879	0,4063	0,4249	0,4440
	1,45	0,2678	0,2898	0,3100	0,3293	0,3482	0,3667	0,3852	0,4038	0,4225	0,4416
	1,50	0,2626	0,2857	0,3065	0,3262	0,3453	0,3640	0,3827	0,4013	0,4201	0,4393
0,25	1,00	0,3287	0,3458	0,3628	0,3798	0,3968	0,4138	0,4310	0,4484	0,4663	0,4822
	1,05	0,3216	0,3391	0,3565	0,3738	0,3910	0,4083	0,4257	0,4433	0,4613	0,4801
	1,10	0,3144	0,3326	0,3504	0,3680	0,3855	0,4030	0,4206	0,4384	0,4566	0,4756
	1,15	0,3072	0,3261	0,3444	0,3624	0,3802	0,3980	0,4158	0,4338	0,4521	0,4712
	1,20	0,2999	0,3196	0,3385	0,3570	0,3751	0,3932	0,4112	0,4294	0,4479	0,4671
	1,25	0,2922	0,3132	0,3328	0,3517	0,3702	0,3886	0,4069	0,4253	0,4439	0,4631
	1,30	0,2838	0,3065	0,3270	0,3465	0,3655	0,3841	0,4027	0,4213	0,4401	0,4594
	1,35	0,2741	0,2996	0,3213	0,3415	0,3609	0,3799	0,3987	0,4175	0,4364	0,4559
	1,40	0,2601	0,2922	0,3155	0,3364	0,3564	0,3757	0,3948	0,4138	0,4330	0,4525
	1,45		0,2839	0,3095	0,3314	0,3519	0,3717	0,3911	0,4103	0,4296	0,4493
	1,50		0,2733	0,3032	0,3264	0,3476	0,3678	0,3875	0,4069	0,4264	0,4463
0,3	1,00	0,3468	0,3636	0,3802	0,3969	0,4136	0,4303	0,4472	0,4645	0,4810	0,4890
	1,05	0,3385	0,3558	0,3729	0,3899	0,4069	0,4239	0,4411	0,4586	0,4766	0,4866
	1,10	0,3300	0,3480	0,3656	0,3831	0,4004	0,4178	0,4352	0,4529	0,4711	0,4843
	1,15	0,3212	0,3401	0,3584	0,3763	0,3941	0,4118	0,4296	0,4475	0,4659	0,4822
	1,20	0,3118	0,3320	0,3511	0,3697	0,3879	0,4060	0,4241	0,4423	0,4609	0,4802
	1,25	0,3011	0,3234	0,3437	0,3630	0,3818	0,4003	0,4187	0,4372	0,4560	0,4757
	1,30	0,2872	0,3141	0,3361	0,3563	0,3758	0,3948	0,4136	0,4323	0,4514	0,4711
	1,35	0,2468	0,3031	0,3280	0,3495	0,3698	0,3893	0,4085	0,4276	0,4469	0,4668
	1,40		0,2867	0,3190	0,3425	0,3637	0,3839	0,4035	0,4230	0,4426	0,4626
	1,45			0,3083	0,3351	0,3576	0,3785	0,3987	0,4185	0,4384	0,4586
	1,50			0,2912	0,3269	0,3513	0,3731	0,3939	0,4141	0,4343	0,4547

μ_{lu} pour S 500 PH ; f_{ck} = 35 MPa ; α_o = 24

		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,2928	0,3078	0,3229	0,3383	0,3538	0,3695	0,3855	0,4018	0,4184	0,4354
0,05	1,00	0,2971	0,3127	0,3284	0,3442	0,3602	0,3764	0,3928	0,4095	0,4265	0,4440
	1,05	0,2963	0,3118	0,3275	0,3434	0,3594	0,3756	0,3920	0,4087	0,4257	0,4432
	1,10	0,2955	0,3111	0,3268	0,3426	0,3586	0,3748	0,3913	0,4080	0,4250	0,4425
	1,15	0,2948	0,3103	0,3261	0,3419	0,3579	0,3742	0,3906	0,4073	0,4243	0,4418
	1,20	0,2941	0,3097	0,3254	0,3413	0,3573	0,3735	0,3900	0,4067	0,4237	0,4412
	1,25	0,2935	0,3091	0,3248	0,3407	0,3567	0,3730	0,3894	0,4061	0,4231	0,4407
	1,30	0,2930	0,3085	0,3243	0,3401	0,3562	0,3724	0,3889	0,4056	0,4226	0,4401
	1,35	0,2924	0,3080	0,3238	0,3396	0,3557	0,3719	0,3884	0,4051	0,4221	0,4397
	1,40	0,2919	0,3076	0,3233	0,3392	0,3552	0,3715	0,3879	0,4046	0,4217	0,4392
	1,45	0,2915	0,3071	0,3228	0,3387	0,3548	0,3710	0,3875	0,4042	0,4213	0,4388
	1,50	0,2911	0,3067	0,3224	0,3383	0,3544	0,3706	0,3871	0,4038	0,4209	0,4384
0,1	1,00	0,3028	0,3190	0,3353	0,3516	0,3681	0,3847	0,4015	0,4186	0,4360	0,4539
	1,05	0,3009	0,3171	0,3334	0,3498	0,3663	0,3829	0,3998	0,4168	0,4343	0,4523
	1,10	0,2991	0,3154	0,3317	0,3481	0,3646	0,3813	0,3982	0,4153	0,4327	0,4507
	1,15	0,2974	0,3137	0,3301	0,3465	0,3631	0,3798	0,3967	0,4138	0,4313	0,4493
	1,20	0,2959	0,3122	0,3286	0,3451	0,3617	0,3784	0,3954	0,4125	0,4300	0,4480
	1,25	0,2945	0,3108	0,3273	0,3438	0,3604	0,3772	0,3941	0,4113	0,4288	0,4468
	1,30	0,2931	0,3096	0,3260	0,3426	0,3592	0,3760	0,3929	0,4101	0,4277	0,4457
	1,35	0,2919	0,3084	0,3248	0,3414	0,3581	0,3749	0,3919	0,4091	0,4266	0,4447
	1,40	0,2907	0,3072	0,3238	0,3403	0,3570	0,3739	0,3909	0,4081	0,4257	0,4437
	1,45	0,2896	0,3062	0,3227	0,3393	0,3561	0,3729	0,3899	0,4072	0,4247	0,4428
	1,50	0,2886	0,3052	0,3218	0,3384	0,3551	0,3720	0,3890	0,4063	0,4239	0,4419
0,15	1,00	0,3105	0,3273	0,3440	0,3608	0,3777	0,3946	0,4117	0,4291	0,4468	0,4652
	1,05	0,3072	0,3241	0,3410	0,3578	0,3748	0,3918	0,4090	0,4264	0,4442	0,4626
	1,10	0,3041	0,3211	0,3381	0,3551	0,3721	0,3892	0,4064	0,4239	0,4418	0,4602
	1,15	0,3012	0,3183	0,3354	0,3525	0,3696	0,3868	0,4041	0,4216	0,4395	0,4580
	1,20	0,2984	0,3157	0,3329	0,3501	0,3673	0,3845	0,4019	0,4195	0,4374	0,4559
	1,25	0,2958	0,3133	0,3306	0,3478	0,3651	0,3824	0,3999	0,4175	0,4355	0,4540
	1,30	0,2934	0,3110	0,3284	0,3457	0,3631	0,3805	0,3980	0,4157	0,4337	0,4522
	1,35	0,2911	0,3088	0,3263	0,3438	0,3612	0,3786	0,3962	0,4140	0,4320	0,4506
	1,40	0,2889	0,3068	0,3244	0,3419	0,3594	0,3769	0,3945	0,4123	0,4304	0,4490
	1,45	0,2868	0,3048	0,3225	0,3402	0,3577	0,3753	0,3930	0,4108	0,4289	0,4476
	1,50	0,2849	0,3030	0,3208	0,3385	0,3561	0,3738	0,3915	0,4094	0,4275	0,4462
0,2	1,00	0,3208	0,3380	0,3551	0,3721	0,3892	0,4063	0,4236	0,4411	0,4590	0,4779
	1,05	0,3159	0,3333	0,3506	0,3679	0,3851	0,4024	0,4198	0,4374	0,4555	0,4744
	1,10	0,3111	0,3289	0,3465	0,3639	0,3813	0,3987	0,4163	0,4340	0,4522	0,4711
	1,15	0,3066	0,3247	0,3425	0,3601	0,3777	0,3953	0,4130	0,4308	0,4491	0,4680
	1,20	0,3022	0,3207	0,3387	0,3566	0,3743	0,3921	0,4099	0,4278	0,4462	0,4651
	1,25	0,2980	0,3168	0,3352	0,3532	0,3712	0,3890	0,4070	0,4250	0,4434	0,4624
	1,30	0,2938	0,3131	0,3317	0,3500	0,3681	0,3862	0,4042	0,4224	0,4409	0,4599
	1,35	0,2898	0,3095	0,3285	0,3470	0,3653	0,3834	0,4016	0,4199	0,4385	0,4576
	1,40	0,2858	0,3060	0,3253	0,3441	0,3625	0,3809	0,3991	0,4175	0,4362	0,4554
	1,45	0,2818	0,3026	0,3223	0,3413	0,3599	0,3784	0,3968	0,4153	0,4340	0,4533
	1,50	0,2779	0,2993	0,3194	0,3386	0,3575	0,3761	0,3946	0,4132	0,4320	0,4513
0,25	1,00	0,3341	0,3513	0,3685	0,3855	0,4026	0,4197	0,4369	0,4544	0,4725	0,4848
	1,05	0,3276	0,3453	0,3627	0,3801	0,3974	0,4147	0,4322	0,4499	0,4680	0,4830
	1,10	0,3211	0,3393	0,3572	0,3749	0,3925	0,4100	0,4277	0,4456	0,4639	0,4813
	1,15	0,3147	0,3335	0,3519	0,3699	0,3878	0,4056	0,4234	0,4415	0,4599	0,4794
	1,20	0,3082	0,3278	0,3467	0,3651	0,3833	0,4013	0,4194	0,4376	0,4562	0,4757
	1,25	0,3016	0,3222	0,3416	0,3605	0,3790	0,3973	0,4156	0,4340	0,4527	0,4722
	1,30	0,2946	0,3165	0,3366	0,3559	0,3748	0,3934	0,4119	0,4305	0,4493	0,4689
	1,35	0,2870	0,3107	0,3317	0,3516	0,3708	0,3896	0,4084	0,4272	0,4462	0,4658
	1,40	0,2783	0,3047	0,3268	0,3472	0,3669	0,3861	0,4050	0,4240	0,4431	0,4629
	1,45	0,2660	0,2984	0,3219	0,3430	0,3631	0,3826	0,4018	0,4209	0,4403	0,4601
	1,50		0,2915	0,3169	0,3388	0,3594	0,3792	0,3987	0,4180	0,4375	0,4574
0,3	1,00	0,3502	0,3672	0,3840	0,4007	0,4175	0,4344	0,4514	0,4687	0,4829	0,4910
	1,05	0,3425	0,3599	0,3772	0,3943	0,4115	0,4286	0,4459	0,4634	0,4807	0,4888
	1,10	0,3346	0,3528	0,3705	0,3881	0,4056	0,4230	0,4406	0,4584	0,4767	0,4867
	1,15	0,3265	0,3455	0,3640	0,3820	0,3999	0,4177	0,4355	0,4535	0,4721	0,4848
	1,20	0,3178	0,3381	0,3574	0,3760	0,3943	0,4125	0,4306	0,4489	0,4676	0,4830
	1,25	0,3082	0,3305	0,3507	0,3701	0,3889	0,4074	0,4258	0,4444	0,4633	0,4813
	1,30	0,2965	0,3223	0,3440	0,3641	0,3835	0,4025	0,4213	0,4401	0,4592	0,4793
	1,35	0,2407	0,3130	0,3369	0,3582	0,3782	0,3977	0,4168	0,4359	0,4553	0,4754
	1,40		0,3014	0,3294	0,3521	0,3729	0,3929	0,4125	0,4319	0,4515	0,4718
	1,45			0,3210	0,3458	0,3677	0,3883	0,4083	0,4280	0,4478	0,4682
	1,50			0,3108	0,3392	0,3624	0,3837	0,4041	0,4242	0,4443	0,4649

μ_{lu} pour S 500 PH ; f_{ck} = 35 MPa ; α_e = 27

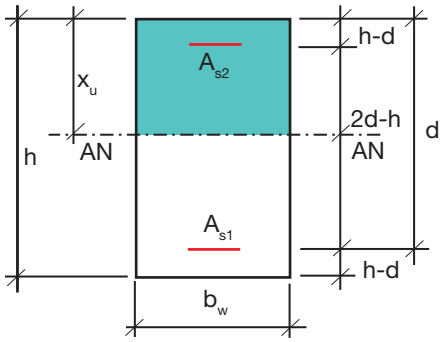
		γ_M									
ν_u	γ_N	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
0		0,3026	0,3178	0,3331	0,3486	0,3642	0,3801	0,3963	0,4127	0,4294	0,4467
0,05	1,00	0,3064	0,3221	0,3379	0,3539	0,3700	0,3863	0,4028	0,4196	0,4367	0,4544
	1,05	0,3057	0,3214	0,3372	0,3531	0,3692	0,3855	0,4021	0,4188	0,4360	0,4537
	1,10	0,3050	0,3207	0,3365	0,3524	0,3686	0,3849	0,4014	0,4182	0,4354	0,4531
	1,15	0,3043	0,3200	0,3359	0,3518	0,3680	0,3843	0,4008	0,4176	0,4348	0,4525
	1,20	0,3037	0,3194	0,3353	0,3513	0,3674	0,3837	0,4002	0,4171	0,4342	0,4519
	1,25	0,3032	0,3189	0,3347	0,3507	0,3669	0,3832	0,3997	0,4165	0,4337	0,4514
	1,30	0,3027	0,3184	0,3343	0,3502	0,3664	0,3827	0,3993	0,4161	0,4333	0,4510
	1,35	0,3022	0,3179	0,3338	0,3498	0,3659	0,3823	0,3988	0,4157	0,4328	0,4506
	1,40	0,3018	0,3175	0,3334	0,3494	0,3655	0,3819	0,3984	0,4152	0,4324	0,4502
	1,45	0,3014	0,3171	0,3330	0,3490	0,3651	0,3815	0,3980	0,4149	0,4321	0,4498
	1,50	0,3010	0,3167	0,3326	0,3486	0,3648	0,3811	0,3977	0,4145	0,4317	0,4494
0,1	1,00	0,3115	0,3277	0,3440	0,3604	0,3770	0,3936	0,4105	0,4276	0,4451	0,4633
	1,05	0,3097	0,3260	0,3424	0,3588	0,3754	0,3921	0,4090	0,4261	0,4436	0,4618
	1,10	0,3081	0,3244	0,3408	0,3573	0,3739	0,3906	0,4075	0,4247	0,4423	0,4605
	1,15	0,3066	0,3230	0,3394	0,3559	0,3725	0,3893	0,4062	0,4234	0,4410	0,4592
	1,20	0,3053	0,3217	0,3381	0,3547	0,3713	0,3881	0,4050	0,4223	0,4399	0,4581
	1,25	0,3040	0,3204	0,3369	0,3535	0,3701	0,3869	0,4039	0,4212	0,4388	0,4570
	1,30	0,3028	0,3193	0,3358	0,3524	0,3691	0,3859	0,4029	0,4202	0,4378	0,4560
	1,35	0,3017	0,3182	0,3347	0,3514	0,3681	0,3849	0,4020	0,4192	0,4369	0,4551
	1,40	0,3007	0,3172	0,3338	0,3504	0,3671	0,3840	0,4011	0,4184	0,4360	0,4542
	1,45	0,2997	0,3163	0,3329	0,3495	0,3663	0,3832	0,4002	0,4175	0,4352	0,4534
	1,50	0,2988	0,3154	0,3320	0,3487	0,3655	0,3824	0,3994	0,4168	0,4344	0,4527
0,15	1,00	0,3182	0,3350	0,3518	0,3686	0,3854	0,4024	0,4196	0,4370	0,4548	0,4734
	1,05	0,3152	0,3321	0,3490	0,3659	0,3829	0,3999	0,4171	0,4346	0,4525	0,4711
	1,10	0,3124	0,3295	0,3464	0,3634	0,3805	0,3976	0,4149	0,4324	0,4503	0,4690
	1,15	0,3098	0,3270	0,3441	0,3611	0,3782	0,3954	0,4128	0,4304	0,4483	0,4670
	1,20	0,3074	0,3247	0,3419	0,3590	0,3762	0,3934	0,4109	0,4285	0,4465	0,4652
	1,25	0,3051	0,3225	0,3398	0,3570	0,3743	0,3916	0,4090	0,4267	0,4448	0,4635
	1,30	0,3030	0,3205	0,3379	0,3552	0,3725	0,3899	0,4074	0,4251	0,4432	0,4619
	1,35	0,3010	0,3186	0,3360	0,3534	0,3708	0,3882	0,4058	0,4236	0,4417	0,4604
	1,40	0,2991	0,3168	0,3343	0,3518	0,3692	0,3867	0,4043	0,4221	0,4403	0,4590
	1,45	0,2973	0,3151	0,3327	0,3502	0,3677	0,3853	0,4029	0,4208	0,4390	0,4577
	1,50	0,2955	0,3135	0,3312	0,3488	0,3663	0,3839	0,4016	0,4195	0,4377	0,4565
0,2	1,00	0,3271	0,3444	0,3615	0,3785	0,3956	0,4128	0,4301	0,4476	0,4657	0,4820
	1,05	0,3227	0,3402	0,3575	0,3747	0,3920	0,4093	0,4267	0,4444	0,4625	0,4807
	1,10	0,3185	0,3362	0,3537	0,3712	0,3886	0,4060	0,4235	0,4413	0,4595	0,4787
	1,15	0,3144	0,3325	0,3502	0,3678	0,3854	0,4029	0,4206	0,4385	0,4568	0,4759
	1,20	0,3106	0,3289	0,3469	0,3647	0,3824	0,4001	0,4179	0,4358	0,4542	0,4734
	1,25	0,3069	0,3255	0,3437	0,3617	0,3795	0,3974	0,4153	0,4333	0,4518	0,4710
	1,30	0,3033	0,3222	0,3407	0,3589	0,3769	0,3948	0,4128	0,4310	0,4495	0,4688
	1,35	0,2998	0,3191	0,3378	0,3562	0,3744	0,3924	0,4106	0,4288	0,4474	0,4667
	1,40	0,2964	0,3161	0,3351	0,3536	0,3720	0,3902	0,4084	0,4267	0,4454	0,4647
	1,45	0,2931	0,3132	0,3325	0,3512	0,3697	0,3880	0,4063	0,4248	0,4435	0,4629
	1,50	0,2899	0,3104	0,3300	0,3489	0,3675	0,3860	0,4044	0,4229	0,4417	0,4611
0,25	1,00	0,3388	0,3562	0,3733	0,3904	0,4075	0,4247	0,4419	0,4595	0,4777	0,4871
	1,05	0,3329	0,3506	0,3681	0,3855	0,4028	0,4202	0,4377	0,4554	0,4737	0,4854
	1,10	0,3270	0,3453	0,3631	0,3808	0,3984	0,4160	0,4336	0,4515	0,4699	0,4839
	1,15	0,3213	0,3400	0,3583	0,3763	0,3942	0,4120	0,4298	0,4479	0,4664	0,4825
	1,20	0,3155	0,3350	0,3537	0,3721	0,3902	0,4082	0,4262	0,4445	0,4631	0,4811
	1,25	0,3097	0,3299	0,3492	0,3679	0,3863	0,4046	0,4228	0,4412	0,4600	0,4798
	1,30	0,3038	0,3250	0,3448	0,3639	0,3826	0,4011	0,4196	0,4381	0,4570	0,4768
	1,35	0,2976	0,3200	0,3405	0,3601	0,3791	0,3978	0,4165	0,4352	0,4542	0,4741
	1,40	0,2909	0,3150	0,3363	0,3563	0,3757	0,3947	0,4135	0,4324	0,4515	0,4715
	1,45	0,2833	0,3099	0,3321	0,3527	0,3724	0,3916	0,4107	0,4297	0,4490	0,4690
	1,50	0,2735	0,3046	0,3279	0,3491	0,3692	0,3887	0,4080	0,4272	0,4466	0,4666
0,3	1,00	0,3533	0,3704	0,3873	0,4041	0,4210	0,4379	0,4549	0,4723	0,4845	0,4927
	1,05	0,3461	0,3637	0,3810	0,3983	0,4154	0,4326	0,4499	0,4675	0,4825	0,4906
	1,10	0,3388	0,3571	0,3749	0,3926	0,4101	0,4275	0,4451	0,4629	0,4806	0,4888
	1,15	0,3313	0,3504	0,3689	0,3870	0,4049	0,4227	0,4405	0,4586	0,4772	0,4870
	1,20	0,3234	0,3437	0,3629	0,3815	0,3998	0,4180	0,4361	0,4544	0,4732	0,4854
	1,25	0,3148	0,3368	0,3569	0,3762	0,3949	0,4134	0,4319	0,4504	0,4694	0,4838
	1,30	0,3048	0,3295	0,3509	0,3709	0,3902	0,4090	0,4278	0,4466	0,4657	0,4824
	1,35	0,2904	0,3216	0,3447	0,3656	0,3855	0,4048	0,4238	0,4429	0,4622	0,4811
	1,40		0,3125	0,3383	0,3603	0,3808	0,4006	0,4200	0,4393	0,4589	0,4794
	1,45		0,3001	0,3314	0,3549	0,3762	0,3965	0,4163	0,4359	0,4556	0,4763
	1,50			0,3238	0,3494	0,3717	0,3925	0,4127	0,4325	0,4525	0,4733

A4 Calcul manuel d'une section rectangulaire avec armatures symétriques à l'ELU par approximations successives

La solution la plus rapide pour résoudre le problème est obtenue en utilisant les diagrammes d'interaction (voir § 5, chapitre 11 : « Flexion composée », p. 443, avec lecture sur l'axe $O\mu_G$ pour la flexion simple). Dans le cas où l'on ne dispose pas de tels diagrammes, on peut utiliser la méthode par approximations successives exposée ci-après.

1. Hypothèses – Notations

Considérons la section rectangulaire symétrique définie ci-dessous :



$A_{s1} = A_{s2} = A$

On se place dans le cas où $0 \leq x_u \leq d$ (section avec au moins une nappe d'aciers tendus).

Cette section est sollicitée en flexion composée sous les sollicitations M_{EdA} et N_{Ed} ; le cas de la flexion simple – $N_{Ed} = 0$ – est traité au § 5 ci-après.

2. Moment de référence

2.1 Si $x_u < h - d$

Les aciers supérieurs sont tendus.

2.1.1 Remarques

Dans le cas général, on a, pour une poutre, $d \approx 0,9h$ et pour des bétons de classe au moins égale à C50/60, si l'on veut se placer au pivot A :

- dans le cas du diagramme σ–ε à palier incliné, il faut que :

$$h - d < \alpha_{AB}.d \Leftrightarrow h < \left(1 + \alpha_{AB}\right)d$$

$$d > \frac{1}{1+\alpha_{AB}}h = \begin{cases} \dfrac{1}{1+0,1346}h = 0,88.h : \text{S 500 A} \\ \dfrac{1}{1+0,0722}h = 0,93.h : \text{S 500 B} \\ \dfrac{1}{1+0,0493}h = 0,95.h : \text{S 500 C} \end{cases}$$

- dans le cas du diagramme σ–ε à palier horizontal, il faut que :

$\alpha_{AB} = 0 \quad \Rightarrow \quad d > h$, ce qui est impossible.

Par conséquent, dans le cas des poutres ($d \approx 0,9h$), on ne peut se trouver au pivot A que pour des bétons de classe au moins égale à C50/60 avec des aciers S 500 A.

2.1.2 Cas du pivot A

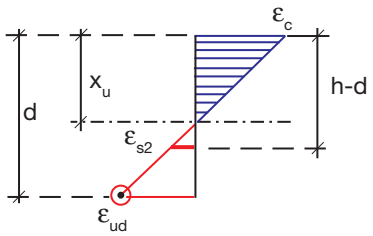
Les aciers avec diagramme σ–ε à palier horizontal ne permettent pas au diagramme des déformations de passer par le pivot A.

2.1.2.1 Aciers supérieurs

Au pivot A, l'allongement des aciers inférieurs est invariable et vaut ε_{ud}.

Allongement des aciers supérieurs :

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{ud}\,\frac{h - d - x_u}{d - x_u}$$



Contrainte des aciers supérieurs supposée prise sur la droite de Hooke :

$$\sigma_{s2} = E_s.\varepsilon_{s2} = 2.10^5.\varepsilon_{ud}\,\frac{h - d - x_u}{d - x_u}. \qquad [1]$$

Cette contrainte est maximale pour $x_u = 0$ et vaut alors :

$$\sigma_{s2,\,max} = 2.10^5.\varepsilon_{ud}\left(\frac{h}{d} - 1\right).$$

Pour les aciers S 500, $\sigma_{s2,\,max}$ reste sur la droite de Hooke tant que :

$$\sigma_{s2,\,max} \le f_{yd} \quad \Leftrightarrow \quad 2.10^5.\varepsilon_{ud}\left(\frac{h}{d} - 1\right) \le f_{yd} = 435\ \text{MPa},$$

nous en déduisons :

$$\sigma_{s2,\,max} \le f_{yd} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{h}{d} \le \frac{435}{2.10^5.\varepsilon_{ud}} + 1$$

$$\Rightarrow \quad \frac{h}{d} \le \begin{cases} \dfrac{435}{2.10^5.22{,}5.10^{-3}} + 1 = 1{,}097 : \text{classe A} \\ \dfrac{435}{2.10^5.45.10^{-3}} + 1 = 1{,}048 : \text{classe B} \\ \dfrac{435}{2.10^5.67{,}5.10^{-3}} + 1 = 1{,}032 : \text{classe C} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \quad d \ge \begin{cases} 0{,}91.h : \text{classe A} \\ 0{,}95.h : \text{classe B} \\ 0{,}97.h : \text{classe C} \end{cases}$$

Comme pour une poutre $d \approx 0{,}9h$, nous ne sommes pas assurés que la contrainte des aciers supérieurs soit toujours située sur la droite de Hooke.

2.1.2.2 Aciers inférieurs

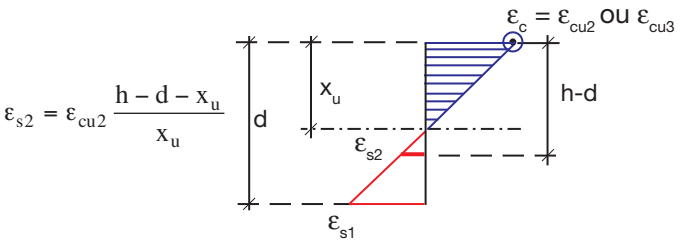
Au pivot A, l'allongement des aciers inférieurs étant invariable et égal à ε_{ud}, la contrainte correspondante vaut (voir § 2.4.2.1, chapitre 3 : « Béton armé – Généralités », p. 53) :

$$\sigma_{s1} = \begin{cases} 454 \text{ MPa : S 500 A,} \\ 466 \text{ MPa : S 500 B,} \\ 493 \text{ MPa : S 500 C.} \end{cases}$$

2.1.3 Cas du pivot B

2.1.3.1 Aciers supérieurs

Allongement des aciers supérieurs :



Contrainte des aciers supérieurs supposée prise sur la droite de Hooke :

$$\sigma_{s2} = E_s.\varepsilon_{s2} = 2.10^5.\varepsilon_{cu2} \frac{h - d - x_u}{x_u}. \qquad [1']$$

2.1.3.2 Aciers inférieurs

Allongement des aciers inférieurs :

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu2} \frac{d - x_u}{x_u}$$

Contrainte des aciers inférieurs supposée prise sur la droite de Hooke :

$$\sigma_{s1} = E_s.\varepsilon_{s1} = 2.10^5.\varepsilon_{cu2} \frac{d - x_u}{x_u}.$$

Pour les aciers S 500 et des bétons de classe au plus égale à C50/60, σ_{s1} reste sur la droite de Hooke tant que :

$$\sigma_{s1} \leq f_{yd} \quad \Leftrightarrow \quad \overbrace{2.10^5.3,5.10^{-3}}^{700} \frac{d - x_u}{x_u} \leq f_{yd}.$$

Nous en déduisons :

$$x_u \geq \frac{700.d}{700 + f_{yd}} = \frac{700.d}{700 + 435} = 0,62.d$$

Comme nous avons supposé que $x_u \leq h - d$, pour les poutres $d \approx 0,9h$ donne $x_u \leq 0,1.d$. Il en résulte que la contrainte des aciers inférieurs se trouve toujours sur le palier (horizontal ou incliné) du diagramme contraintes-déformations de l'acier.

2.2 Si $x_u = h - d$

L'axe neutre passant par le centre de gravité des aciers supérieurs :

$$\varepsilon_{s2} = 0 \quad \Rightarrow \quad \sigma_{s2} = 0.$$

D'où le moment que peut équilibrer la section, rapporté aux aciers inférieurs dans le cas où $x_u = h - d$:

$$M_{RS} = \lambda.b_w\,(h - d) f_{cu}\left[d - \frac{\lambda}{2}(h - d)\right],$$

$$M_{RS} = \lambda.b_w.d^2.f_{cu}\left(\frac{h}{d} - 1\right).\left(1 + \frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda}{2}.\frac{h}{d}\right),$$

$$M_{RS} = \left(\frac{h}{d} - 1\right).\left[\left(\lambda + \frac{\lambda^2}{2}\right) - \frac{\lambda^2}{2}.\frac{h}{d}\right] b_w.d^2.f_{cu}\,.$$

Nous remarquerons que pour les bétons de classe au moins égale à C50/60, nous avons $\lambda = 0,8$ et :

$$\left.\begin{array}{l} \lambda + \dfrac{\lambda^2}{2} = 0,8 + \dfrac{0,8^2}{2} = 1,12 \\ \dfrac{\lambda^2}{2} = \dfrac{0,8^2}{2} = 0,32 \end{array}\right\} \quad \Rightarrow \quad M_{RS} = \left(\frac{h}{d} - 1\right).\left(1,12 - 0,32\frac{h}{d}\right) b_w.d^2.f_{cu}$$

2.3 Si $x_u > h - d$

Voir § 3.2 ci-après.

3. Mise en équation du problème

3.1 Cas où $M_{EdA} \leq M_{RS}$ ($\Leftrightarrow$ x_u h – d)

Les aciers supérieurs sont tendus et les équations d'équilibre donnent :

$$\begin{cases} N_{Ed} = \lambda.b_w.x_u.f_{cu} - A\left(\sigma_{s2} + \sigma_{s1}\right), \\ M_{EdA} = \lambda.b_w.x_u.f_{cu}\left(d - \dfrac{\lambda}{2}x_u\right) - A.\sigma_{s2}\left(2d - h\right), \end{cases}$$

avec :

- au pivot A si $x_u \leq \dfrac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{cu2} + \varepsilon_{ud}} d$:

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{ud} \frac{h - d - x_u}{d - x_u},$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \text{si } \varepsilon_{s2} < \varepsilon_{yd} = \dfrac{f_{yd}}{E_s} : \sigma_{s2} = E_s.\varepsilon_{s2} = 2.10^5.\varepsilon_{s2} \\ \text{si } \varepsilon_{s2} \geq \varepsilon_{yd} = \dfrac{f_{yd}}{E_s} : \sigma_{s2} = \begin{cases} A + B.\varepsilon_{s2} : \text{diagramme } \sigma - \varepsilon \text{ à palier incliné,} \\ f_{yd} : \text{diagramme } \sigma - \varepsilon \text{ à palier horizontal.} \end{cases} \end{cases}$$

les coefficients A et B sont ceux figurant au § 2.4.2.1, chapitre 3 : « Béton armé – Généralités », p. 53, suivant la classe d'aciers considérés (pour les aciers avec diagramme σ–ε à palier horizontal, on ne peut se trouver au pivot A),

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{ud},$$

$$\Rightarrow \quad \sigma_{s1} = \begin{cases} 454 \text{ MPa : S 500 A,} \\ 466 \text{ MPa : S 500 B,} \\ 493 \text{ MPa : S 500 C.} \end{cases}$$

- au pivot B si $x_u > \dfrac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{cu2} + \varepsilon_{ud}} d$:

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu2} \frac{h - d - x_u}{x_u},$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \text{si } \varepsilon_{s2} < \varepsilon_{yd} = \dfrac{f_{yd}}{E_s} : \sigma_{s2} = E_s.\varepsilon_{s2} = 2.10^5.\varepsilon_{s2} \\ \text{si } \varepsilon_{s2} \geq \varepsilon_{yd} = \dfrac{f_{yd}}{E_s} : \sigma_{s2} = \begin{cases} A + B.\varepsilon_{s2} : \text{diagramme } \sigma - \varepsilon \text{ à palier incliné,} \\ f_{yd} : \text{diagramme } \sigma - \varepsilon \text{ à palier horizontal.} \end{cases} \end{cases}$$

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu2}\frac{d - x_u}{x_u},$$

$$\Rightarrow \quad \sigma_{s1} = \begin{cases} A + B.\varepsilon_{s1} : \text{diagramme } \sigma - \varepsilon \text{ à palier incliné,} \\ f_{yd} : \text{diagramme } \sigma - \varepsilon \text{ à palier horizontal,} \end{cases}$$

A_{s1} et x_u sont inconnus a priori.

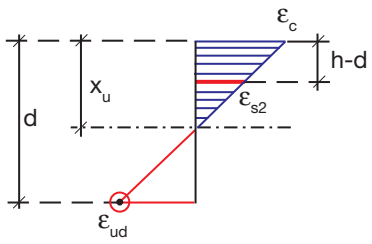
3.2 Cas où $M_{EdA} > M_{RS}$ ($\Leftrightarrow$ $x_u > h - d$)

Les aciers supérieurs sont comprimés.

3.2.1 Cas où $h - d < x_u \leq \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{cu2} + \varepsilon_{ud}} d$ et où le diagramme σ–ε des aciers est à palier incliné

On est au pivot A et le raccourcissement des aciers supérieurs vaut :

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{ud}.\frac{x_u - (h - d)}{d - x_u}$$



D'où leur contrainte supposée prise sur la droite de Hooke :

$$\sigma_{s2} = E_s.\varepsilon_{s2} = 2.10^5.\varepsilon_{ud}\frac{x_u - h + d}{d - x_u} \qquad [4]$$

Cette contrainte ne peut atteindre f_{yd} que si :

$$\sigma_{s2} \geq f_{yd} \quad \Leftrightarrow \quad 2.10^5.\varepsilon_{ud}\frac{x_u - h + d}{d - x_u} \geq f_{yd},$$

$$x_u \geq \frac{d.f_{yd} + 2.10^5.\varepsilon_{ud}(h - d)}{2.10^5.\varepsilon_{ud} + f_{yd}}$$

Ou, comme on a supposé $x_u \leq \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{cu2} + \varepsilon_{ud}} d$, si :

$$\frac{2.10^5.\varepsilon_{ud}.h - d\left(2.10^5.\varepsilon_{ud} - f_{yd}\right)}{2.10^5.\varepsilon_{ud} + f_{yd}} \le \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{cu2} + \varepsilon_{ud}} d.$$

Cette circonstance ne peut se rencontrer que si :

$$2.10^5.\varepsilon_{ud}.h - 2.10^5.\varepsilon_{ud}.d + d.f_{yd} \le 2.10^5.\varepsilon_{ud} \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{cu2} + \varepsilon_{ud}} d + \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{cu2} + \varepsilon_{ud}} d.f_{yd}$$

$$f_{yd} \le \frac{-2.10^5.\varepsilon_{ud}.h + 2.10^5.\varepsilon_{ud}\left(1 + \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{cu2} + \varepsilon_{ud}}\right) d}{\left(1 - \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{cu2} + \varepsilon_{ud}}\right) d}$$

$$f_{yd} \le 2.10^5.\varepsilon_{ud} \frac{-h + \left(1 + \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{cu2} + \varepsilon_{ud}}\right) d}{\left(1 - \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{cu2} + \varepsilon_{ud}}\right) d},$$

Ce qui conduit, dans le cas général où $h \approx 1{,}1.d$ et où $\varepsilon_{cu2} = 3{,}5\ ‰$ $\left(f_{ck} \le 50\ \text{MPa}\right)$ à :

$$f_{yd} \le 2.10^5.\varepsilon_{ud} \frac{-1{,}1 + \left(1 + \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{cu2} + \varepsilon_{ud}}\right)}{1 - \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{cu2} + \varepsilon_{ud}}}$$

$$f_{yd} \le \begin{cases} 180\ \text{MPa} : \text{S 500 A}\ \left(\varepsilon_{ud} = 22{,}5\ ‰\right) \\ -270\ \text{MPa} : \text{S 500 B}\ \left(\varepsilon_{ud} = 45\ ‰\right) \\ -720\ \text{MPa} : \text{S 500 C}\ \left(\varepsilon_{ud} = 67{,}5\ ‰\right) \end{cases}.$$

Conclusion

Dans le cas envisagé ($h - d < x_u \le \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{cu2} + \varepsilon_{ud}} d$), si l'on emploie des aciers S 500, $f_{yd} = 435\ \text{MPa} > 180\ \text{MPa}$ et la contrainte des aciers supérieurs ne peut atteindre f_{yd}.

Les équations d'équilibre s'écrivent donc :

$$\begin{cases} N_{Ed} = \lambda.b_w.x_u.f_{cu} + A.\sigma_{s2} - A.\sigma_{s1} \\ \qquad = \lambda.b_w.x_u.f_{cu} - A.\left(\sigma_{s1} - \sigma_{s2}\right), & [5] \\ M_{EdA} = \lambda.b_w.x_u.f_{cu}\left(d - \frac{\lambda}{2}x_u\right) + A.\sigma_{s2}\left(2d - h\right), & [6] \end{cases}$$

avec :

$$\sigma_{s2} = E_s.\varepsilon_{s2} = 2.10^5.\varepsilon_{ud}\frac{x_u - h + d}{d - x_u} \text{ et } \sigma_{s1} = \begin{cases} 454 \text{ MPa : S 500 A,} \\ 466 \text{ MPa : S 500 B,} \\ 493 \text{ MPa : S 500 C.} \end{cases}$$

A_{s1} et x_u sont inconnus a priori.

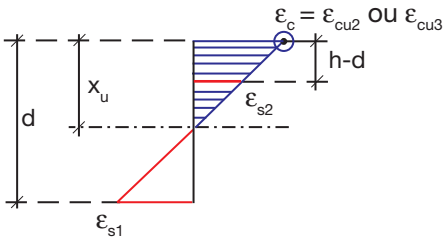
3.2.2 Autres cas

Il s'agit des cas suivants :

- $x_u > \dfrac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{cu2} + \varepsilon_{ud}} d$ pour les aciers avec diagramme σ–ε à palier incliné ;
- aciers avec diagramme σ–ε à palier horizontal, quelle que soit la valeur de x_u.

On est au pivot B et le raccourcissement des aciers supérieurs vaut :

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu2}\frac{x_u - (h - d)}{x_u}$$



D'où leur contrainte supposée prise sur la droite de Hooke :

$$\sigma_{s2} = E_s.\varepsilon_{s2} = 2.10^5.\varepsilon_{cu2}\frac{x_u - (h - d)}{x_u}. \qquad [7]$$

Cette valeur n'atteint f_{yd} que si :

$$\sigma_{s2} \geq f_{yd} \quad \Leftrightarrow \quad 2.10^5.\varepsilon_{cu2}\frac{x_u - (h - d)}{x_u} \geq f_{yd},$$

$$x_u \geq \frac{2.10^5.\varepsilon_{cu2}(h - d)}{2.10^5.\varepsilon_{cu2} - f_{yd}} = x_e .$$

Ce qui conduit pour les aciers S 500 et $h \approx 1{,}1.d$ à :

$$x_e = \frac{2.10^5.\varepsilon_{cu2}}{2.10^5.\varepsilon_{cu2} - f_{yd}}(h - d) \qquad [8]$$

Remarque

Pour des bétons de classe de résistance au plus égale à C50/60 : $\varepsilon_{cu2} = 3{,}5$ ‰ et pour des aciers S 500 :

$$x_e = \frac{2.10^5.3{,}5.10^{-3}}{2.10^5.3{,}5.10^{-3} - 435}(h - d) = 2{,}64\,(h - d) \qquad [8']$$

Conclusion

En posant : $x_e = \dfrac{2.10^5.\varepsilon_{cu2}}{2.10^5.\varepsilon_{cu2} - f_{yd}}(h - d)$:

1/ si $h - d < x_u \leq x_e$, les équations d'équilibre s'écrivent :

$$\begin{cases} N_{Ed} = \lambda.b_w.x_u.f_{cu} + A.(\sigma_{s2} - \sigma_{s1}) \\ \qquad = \lambda.b_w.x_u.f_{cu} - A.(\sigma_{s1} - \sigma_{s2}), & [9] \\ M_{EdA} = \lambda.b_w.x_u.f_{cu}\left(d - \dfrac{\lambda}{2}x_u\right) + A.\sigma_{s2}(2d - h), & [10] \end{cases}$$

avec :

$$\sigma_{s2} = 2.10^5.\varepsilon_{cu2}\frac{x_u - (h - d)}{x_u},$$

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu2}\frac{d - x_u}{x_u},$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \text{si } \varepsilon_{s1} < \varepsilon_{yd} = \dfrac{f_{yd}}{E_s} : \sigma_{s1} = E_s.\varepsilon_{s1} = 2.10^5.\varepsilon_{s1} \\ \text{si } \varepsilon_{s1} \geq \varepsilon_{yd} = \dfrac{f_{yd}}{E_s} : \sigma_{s1} = \begin{cases} A + B.\varepsilon_{s1} : \text{diagramme } \sigma - \varepsilon \text{ à palier incliné,} \\ f_{yd} : \text{diagramme } \sigma - \varepsilon \text{ à palier horizontal,} \end{cases} \end{cases}$$

A_{s1} et x_u sont inconnus a priori.

2/ si $x_u > x_e$, $\sigma_{s2} \geq f_{ed}$ et les équations d'équilibre deviennent :

$$\begin{cases} N_{Ed} = \lambda.b_w.x_u.f_{cu} + A.(\sigma_{s2} - \sigma_{s1}) \\ \qquad = \lambda.b_w.x_u.f_{cu} - A.(\sigma_{s1} - \sigma_{s2}), & [9] \\ M_{EdA} = \lambda.b_w.x_u.f_{cu}\left(d - \dfrac{\lambda}{2}x_u\right) + A.\sigma_{s2}(2d - h), & [10] \end{cases}$$

avec :

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu2}\frac{x_u - (h-d)}{x_u},$$

$$\Rightarrow \quad \sigma_{s2} = \begin{cases} A + B.\varepsilon_{s2} : \text{diagramme } \sigma - \varepsilon \text{ à palier incliné,} \\ f_{yd} : \text{diagramme } \sigma - \varepsilon \text{ à palier horizontal.} \end{cases}$$

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu2}\frac{d - x_u}{x_u},$$

$$\Rightarrow \quad \begin{cases} \text{si } \varepsilon_{s1} < \varepsilon_{yd} = \dfrac{f_{yd}}{E_s} : \sigma_{s1} = E_s.\varepsilon_{s1} = 2.10^5.\varepsilon_{s1} \\ \text{si } \varepsilon_{s1} \geq \varepsilon_{yd} = \dfrac{f_{yd}}{E_s} : \sigma_{s1} = \begin{cases} A + B.\varepsilon_{s1} : \text{diagramme } \sigma - \varepsilon \text{ à palier incliné,} \\ f_{yd} : \text{diagramme } \sigma - \varepsilon \text{ à palier horizontal,} \end{cases} \end{cases}$$

4. Méthode par approximations successives

On opère de la façon suivante :

1/ déterminer dans quel cas on se trouve en comparant M_{EdA} à M_{RS} (aciers supérieurs comprimés ou tendus, voir § 3.2) ;

2/ en se donnant x_u, calculer les contraintes σ_{s2} et σ_{s1} correspondantes ;

3/ en déduire A_{s1} par l'équation d'équilibre des moments ;

4/ évaluer N_{Ed} à partir de x_u et A_{s1} trouvé à l'étape 3 ;

5/ comparer la valeur de N_{Ed} trouvée à l'étape 4 à celle de $N_{Ed,\ réel}$ et reprendre le calcul depuis l'étape 2 en modifiant la valeur de x_u jusqu'à ce que $N_{Ed,\ calculé} \approx N_{Ed,\ réel}$.

5. Cas de la flexion simple

La seule chose qui change est que $N_{Ed} = 0$ dans les équations d'équilibre.

Pour les aciers avec diagramme σ–ε à palier horizontal, le cas où $x_u > x_e$ ne peut se rencontrer. Dans un tel cas, l'équilibre devrait être assuré par les aciers seuls (voir $\sigma_{s1} = \sigma_{s2} = f_{yd}$ avec $N_{Ed} = 0 \Rightarrow x_u = 0$ par l'équation [9]) sans intervention du béton comprimé entourant les armatures supérieures comprimées, ce qui n'est pas possible.

6. Conclusion

Compte tenu des développements ci-dessus, on voit que, même en flexion simple, la solution la plus rapide est fournie par les diagrammes d'interaction (voir § 5.8, chapitre 11 : « Flexion composée », p. 443, lecture sur l'axe $O\mu_G$ pour la flexion simple).

Les développements précédents ayant été conduits uniquement à l'ELU, il reste à vérifier, à l'ELS, les contraintes du béton comprimé et des aciers tendus lorsque celles-ci sont limitées.

7. Organigramme

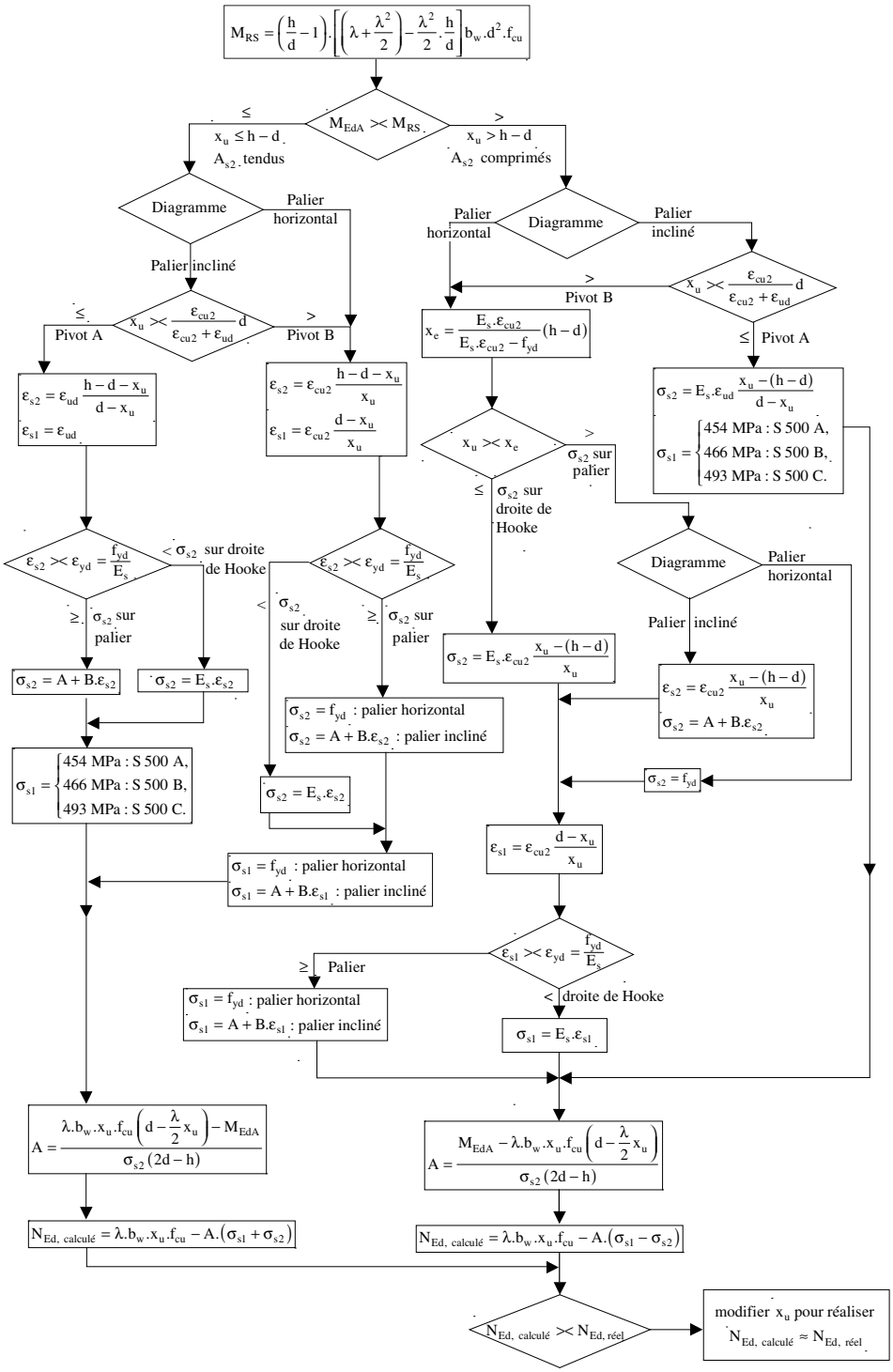
Données :

- géométie de la section : b_w, h, d ;
- sollicitations : M_{EdA} et $N_{Ed,\ réel}$;
- matériaux :
  - béton : f_{cu}, ε_{cu2} ;
  - aciers : f_{yd}, ε_{ud}, forme du diagramme σ–ε, E_s ;
- position arbitraire de l'axe neutre : x_u.

Résultats : section d'aciers $A = A_{s1} = A_{s2}$

Remarque

Dans l'organigramme ci-dessous, les coefficients A et B intervenant dans les expressions de σ_{s1} et σ_{s2} sont ceux figurant au § 2.4.2.1, chapitre 3 : « Béton armé – Généralités », p. 53, suivant la classe d'aciers considérés.


$M_{RS} = \left(\frac{h}{d} - 1\right).\left[\left(\lambda + \frac{\lambda^2}{2}\right) - \frac{\lambda^2}{2}.\frac{h}{d}\right] b_w.d^2.f_{cu}$
$M_{EdA} \lessgtr M_{RS}$
≤ $x_u \le h - d$ A_{s2} tendus
> $x_u > h - d$ A_{s2} comprimés
Diagramme
Palier horizontal
Palier incliné
$x_u \lessgtr \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{cu2} + \varepsilon_{ud}} d$
Pivot A
Pivot B
$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{ud} \frac{h - d - x_u}{d - x_u}$
$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{ud}$
$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu2} \frac{h - d - x_u}{x_u}$
$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu2} \frac{d - x_u}{x_u}$
$\varepsilon_{s2} \lessgtr \varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s}$
< σ_{s2} sur droite de Hooke
≥ σ_{s2} sur palier
$\sigma_{s2} = A + B.\varepsilon_{s2}$
$\sigma_{s2} = E_s.\varepsilon_{s2}$
$\sigma_{s1} = \begin{cases} 454 \text{ MPa : S 500 A,} \\ 466 \text{ MPa : S 500 B,} \\ 493 \text{ MPa : S 500 C.} \end{cases}$
$\sigma_{s2} = f_{yd}$: palier horizontal
$\sigma_{s2} = A + B.\varepsilon_{s2}$: palier incliné
$\sigma_{s1} = f_{yd}$: palier horizontal
$\sigma_{s1} = A + B.\varepsilon_{s1}$: palier incliné
$x_e = \frac{E_s.\varepsilon_{cu2}}{E_s.\varepsilon_{cu2} - f_{yd}} (h - d)$
$x_u \lessgtr x_e$
> σ_{s2} sur palier
≤ σ_{s2} sur droite de Hooke
$\sigma_{s2} = E_s.\varepsilon_{cu2} \frac{x_u - (h - d)}{x_u}$
$\sigma_{s2} = f_{yd}$
$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu2} \frac{d - x_u}{x_u}$
$\varepsilon_{s1} \lessgtr \varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s}$
≥ Palier
< droite de Hooke
$\sigma_{s1} = f_{yd}$: palier horizontal
$\sigma_{s1} = A + B.\varepsilon_{s1}$: palier incliné
$\sigma_{s1} = E_s.\varepsilon_{s1}$
$\sigma_{s2} = E_s.\varepsilon_{ud} \frac{x_u - (h - d)}{d - x_u}$
$\sigma_{s1} = \begin{cases} 454 \text{ MPa : S 500 A,} \\ 466 \text{ MPa : S 500 B,} \\ 493 \text{ MPa : S 500 C.} \end{cases}$
$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu2} \frac{x_u - (h - d)}{x_u}$
$\sigma_{s2} = A + B.\varepsilon_{s2}$
$A = \frac{\lambda.b_w.x_u.f_{cu}\left(d - \frac{\lambda}{2}x_u\right) - M_{EdA}}{\sigma_{s2}(2d - h)}$
$A = \frac{M_{EdA} - \lambda.b_w.x_u.f_{cu}\left(d - \frac{\lambda}{2}x_u\right)}{\sigma_{s2}(2d - h)}$
$N_{Ed,\ calculé} = \lambda.b_w.x_u.f_{cu} - A.(\sigma_{s1} + \sigma_{s2})$
$N_{Ed,\ calculé} = \lambda.b_w.x_u.f_{cu} - A.(\sigma_{s1} - \sigma_{s2})$
$N_{Ed,\ calculé} \lessgtr N_{Ed,\ réel}$
modifier x_u pour réaliser $N_{Ed,\ calculé} \approx N_{Ed,\ réel}$

8. Applications numériques

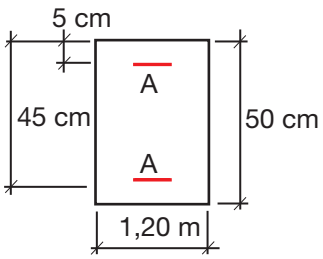
8.1 Pose du problème n° 1 – Cas où $M_{EdA} \leq M_{RS}$

On considère la section rectangulaire symétrique définie ci-contre.

Matériaux :

- béton : f_{cu} = 16,7 MPa, ε_{cu2} = 0,0035 ;
- aciers : f_{yd} = 435 MPa, $E_s = 2.10^5$ MPa.

Sollicitations : M_{EdA} = 0,160 mMN, N_{Ed} = 0,12633 MN.



Nous nous proposons de déterminer les armatures dans les cas suivants :

- aciers avec diagramme σ–ε à palier horizontal ($\varepsilon_{ud} = \infty$) ;
- aciers avec diagramme σ–ε à palier incliné (ε_{ud} = 45 ‰, B = 727,27 et A = 433,20 pour aciers S 500 B).

8.2 Solution

8.2.1 Cas du diagramme σ–ε à palier horizontal

Moment de référence :

$$M_{RS} = \left(\frac{h}{d} - 1\right).\left[\left(\lambda + \frac{\lambda^2}{2}\right) - \frac{\lambda^2}{2}.\frac{h}{d}\right] b_w.d^2.f_{cu}$$

$$M_{RS} = \left(\frac{0{,}50}{0{,}45} - 1\right).\left[\left(0{,}8 + \frac{0{,}8^2}{2}\right) - \frac{0{,}8^2}{2}.\frac{0{,}50}{0{,}45}\right] 1{,}20.0{,}45^2.16{,}7$$

$$M_{RS} = 0{,}345 \text{ mMN}$$

Position de l'axe neutre :

M_{EdA} >< M_{RS} $\qquad$ M_{EdA} = 0,160 mMN < 0,345 mMN = M_{RS}

$x_u < h - d$ et les aciers supérieurs sont tendus.

Comme h – d = 0,05 m, prenons x_u = 0,03 m.

Première itération :

diagramme σ–ε à palier horizontal ⇒ Pivot B

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu2}\frac{h - d - x_u}{x_u} \qquad \varepsilon_{s2} = 0,0035\frac{0,50 - 0,45 - 0,03}{0,03} = 0,00233$$

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu2}\frac{d - x_u}{x_u} \qquad \varepsilon_{s1} = 0,0035\frac{0,45 - 0,03}{0,03} = 0,049$$

$$\varepsilon_{s2} >< \varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} \qquad \varepsilon_{s2} = 0,00233 > 0,00218 = \varepsilon_{yd} = \frac{435}{2.10^5}$$

$$\Rightarrow \quad \sigma_{s2} = f_{yd} = 435 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{s1} >< \varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} \qquad \varepsilon_{s1} = 0,049 > 0,00218 = \varepsilon_{yd} = \frac{435}{2.10^5}$$

$$\Rightarrow \quad \sigma_{s1} = f_{yd} = 435 \text{ MPa}$$

$$A = \frac{\lambda.b_w.x_u.f_{cu}\left(d - \frac{\lambda}{2}x_u\right) - M_{EdA}}{\sigma_{s2}(2d - h)}$$

$$A = \frac{0,8.1,20.0,03.16,7\left(0,45 - \frac{0,8}{2}0,03\right) - 0,160}{435(2.0,45 - 0,50)}$$

$$A = 2,91 \text{ cm}^2$$

$$N_{Ed,\ calculé} = \lambda.b_w.x_u.f_{cu} - A.\left(\sigma_{s1} + \sigma_{s2}\right)$$

$$N_{Ed,\ calculé} = 0,8.1,20.0,03.16,7 - 2,91.10^{-4}.(435 + 435)$$

$$N_{Ed,\ calculé} = 0,228 \text{ MN}$$

$N_{Ed,\ calculé} >< N_{Ed,\ réel}$ $\qquad N_{Ed,\ calculé} = 0,228 \text{ MN} > 0,12633 \text{ MN} = N_{u,\ réel}$

Comme $N_{Ed,\ calculé} > N_{Ed,\ réel}$, nous allons augmenter la valeur de x_u, ce qui aura pour effet de diminuer la contrainte σ_{s2} (mais faiblement) et d'augmenter la section d'aciers A (fortement) d'où le terme soustractif de $N_{Ed,\ calculé}$ augmente.

Itérations suivantes :

Étant donné la pente du diagramme contraintes-déformations de l'acier, σ_{s2} varie très vite.

Essayons $x_u = 0,045$ m et cherchons, par itérations successives à réaliser $N_{Ed,\ calculé} \approx N_{Ed,\ réel}$.

Données :

Géométrie :	b_w	1,2	m	
	h	0,5	m	
	d	0,45	m	
Béton :	f_{ck}	25	MPa	
	f_{cu}	16,7	MPa	
	λ	0,8		
	ε_{cu2}	0,0035		
Aciers :	f_{yd}	435	MPa	
	B	0		: valeur ou 0 pour diagramme σ–ε à palier horizontal
	A	435		: valeur ou f_{yd} pour diagramme σ–ε à palier horizontal
	ε_{ud}	1000000		: valeur ou infini (1 000 000) pour diagramme σ–ε à palier horizontal
	ε_{yd}	0,002175		
Sollicitations :	M_{EdA}	0,16	mMN	
	$N_{Ed,\,réel}$	0,12633	MN	

$$x_e = \frac{E_s.\varepsilon_{cu2}}{E_s.\varepsilon_{cu2} - f_{yd}}(h-d) \qquad 0$$

Références :	$M_{RS}=\left(\frac{h}{d}-1\right)\left[\left(\lambda+\frac{\lambda^2}{2}\right)-\frac{\lambda^2}{2}.\frac{h}{d}\right]b_w.d^2.f_{cu}$	0,344688																			
	$\alpha_{AB}.d$	1,575E-09																			
Calculs itératifs :	x_u	0,03	0,045	0,0375	0,03375	0,031875	0,0328125	0,03328125	0,033046875	0,033164063	0,033222656	0,033251953	0,033266602	0,033259277	0,033255615	0,033257446	0,033256531	0,033256989	0,03325676		
	Pivot	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B		
Piv B	$\varepsilon_{s2}=\varepsilon_{cu2}\frac{h-d-x_u}{x_u}$	0,002333333	0,000388889	0,001166667	0,001685185	0,001990196	0,001833333	0,001758216	0,001795508	0,001776796	0,00176749	0,001762849	0,001760531	0,00176169	0,001762269	0,001761979	0,001762124	0,001762052	0,001762088		
	$\varepsilon_{s2}=\varepsilon_{cu2}\frac{x_u-(h-d)}{x_u}$	-0,00233333	-0,00038889	-0,00116667	-0,00168519	-0,0019902	-0,00183333	-0,00175822	-0,00179551	-0,0017768	-0,00176749	-0,00176285	-0,00176053	-0,00176169	-0,00176227	-0,00176198	-0,00176212	-0,00176205	-0,00176209		
Piv A	$\varepsilon_{s2}=\varepsilon_{ud}\frac{h-d-x_u}{d-x_u}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	$\varepsilon_{s2}=\varepsilon_{ud}\frac{x_u-(h-d)}{d-x_u}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Piv B	$\varepsilon_{s1}=\varepsilon_{cu2}\frac{d-x_u}{x_u}$	0,049	0,0315	0,0385	0,043166667	0,045911765	0,0445	0,043823944	0,044159574	0,043991166	0,043907407	0,043865639	0,043844782	0,043855208	0,043860423	0,043857815	0,043859119	0,043858467	0,043858793		
Piv A	$\varepsilon_{s1}=\varepsilon_{ud}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Retenu	ε_{s2}	0,002333333	0,000388889	0,001166667	0,001685185	0,001990196	0,001833333	0,001758216	0,001795508	0,001776796	0,00176749	0,001762849	0,001760531	0,00176169	0,001762269	0,001761979	0,001762124	0,001762052	0,001762088		
Retenu	ε_{s1}	0,049	0,0315	0,0385	0,043166667	0,045911765	0,0445	0,043823944	0,044159574	0,043991166	0,043907407	0,043865639	0,043844782	0,043855208	0,043860423	0,043857815	0,043859119	0,043858467	0,043858793		
Hooke	$\sigma_{s2}=E_s.\varepsilon_{s2}$	0	77,77777778	233,3333333	337,037037	398,0392157	366,6666667	351,6431925	359,1016548	355,3592462	353,4979424	352,5697504	352,1062674	352,3379579	352,4538414	352,3958964	352,4248681	352,4103821	352,417625		
	$\sigma_{s1}=E_s.\varepsilon_{s1}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Palier	$\sigma_{s2}=A+B.\varepsilon_{s2}$	435	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	$\sigma_{s1}=A+B.\varepsilon_{s1}$	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435		
Retenu	σ_{s2}	435	77,77777778	233,3333333	337,037037	398,0392157	366,6666667	351,6431925	359,1016548	355,3592462	353,4979424	352,5697504	352,1062674	352,3379579	352,4538414	352,3958964	352,4248681	352,4103821	352,417625		
Retenu	σ_{s1}	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435		
$M_{EdA} \leq M_{RS}$	$A=\frac{\lambda.b_w.x_u.f_{cu}\left(d-\frac{\lambda}{2}x_u\right)-M_{EdA}}{\sigma_{s2}(2d-h)}$	2,911521839	48,74852571	10,87735714	5,650819615	3,984751533	4,760324574	5,190002785	4,971432263	5,079765256	5,134643468	5,162262674	5,176117577	5,169186342	5,165723563	5,167454716	5,16658908	5,167021883	5,166805478		
	$N_{Ed,\,calculé}=\lambda.b_w.x_u.f_{cu}-A.(\sigma_{s1}+\sigma_{s2})$	0,2276576	-1,77827607	-0,12577004	0,104815797	0,179074571	0,144430647	0,125296964	0,135025241	0,130202306	0,127760044	0,12653112	0,125914698	0,126223073	0,126377137	0,126300115	0,126338629	0,126319373	0,126329001		
	$N_{Ed,\,calculé} \gtrless N_{Ed,\,réel}$	>	<	<	<	>	>	<	>	>	>	>	<	<	>	<	>	<	<		
$M_{EdA} > M_{RS}$	$A=\frac{M_{EdA}-\lambda.b_w.x_u.f_{cu}\left(d-\frac{\lambda}{2}x_u\right)}{\sigma_{s2}(2d-h)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	$N_{Ed,\,calculé}=\lambda.b_w.x_u.f_{cu}-A.(\sigma_{s1}-\sigma_{s2})$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	$N_{Ed,\,calculé} \gtrless N_{Ed,\,réel}$	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<		

8.2.2 Cas du diagramme σ–ε à palier incliné

Moment de référence :

$$M_{RS} = \left(\frac{h}{d} - 1\right).\left[\left(\lambda + \frac{\lambda^2}{2}\right) - \frac{\lambda^2}{d}.\frac{h}{d}\right] b_w.d^2.f_{cu}$$

$$M_{RS} = \left(\frac{0,50}{0,45} - 1\right).\left[\left(0,8 + \frac{0,8^2}{2}\right) - \frac{0,8^2}{2}.\frac{0,50}{0,45}\right] 1,20.0,45^2.16,7$$

$$M_{RS} = 0,345 \text{ mMN}$$

Position de l'axe neutre :

$M_{EdA} >< M_{RS}$ $\quad M_{EdA} = 0,160 \text{ mMN} < 0,345 \text{ mMN} = M_{RS}$

$x_u < h - d$ et les aciers supérieurs sont tendus.

Comme $h - d = 0,05$ m, prenons $x_u = 0,03$ m.

Première itération :

diagramme σ–ε à palier incliné

$$x_u >< \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{cu2} + \varepsilon_{ud}} d \qquad x_u = 0,03 \text{ m} < 0,0324 \text{ m} = \frac{3,5}{3,5 + 45} 0,45$$

$$\Rightarrow \quad \text{Pivot A}$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{ud} \frac{h - d - x_u}{d - x_u} \qquad \varepsilon_{s2} = 0,045 \frac{0,50 - 0,45 - 0,03}{0,45 - 0,03} = 0,00214$$

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{ud} \qquad \varepsilon_{s1} = 0,045$$

$$\varepsilon_{s2} >< \varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} \qquad \varepsilon_{s2} = 0,00214 < 0,00218 = \varepsilon_{yd} = \frac{435}{2.10^5}$$

$$\Rightarrow \quad \sigma_{s2} = E_s.\varepsilon_{s2} = 2.10^5.0,00214 = 428 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{s1} >< \varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} \qquad \varepsilon_{s1} = 0,045 > 0,00218 = \varepsilon_{yd} = \frac{435}{2.10^5}$$

$$\Rightarrow \quad \sigma_{s1} = A + B.\varepsilon_{s1} = 433,2 + 727,27.0,045$$

$$\sigma_{s1} = 466 \text{ MPa}$$

$$A = \frac{\lambda.b_w.x_u.f_{cu}\left(d - \frac{\lambda}{2}x_u\right) - M_{EdA}}{\sigma_{s2}(2d - h)}$$

$$A = \frac{0,8.1,20.0,03.16,7\left(0,45 - \frac{0,8}{2}0,03\right) - 0,160}{428\ (2.0,45 - 0,50)} 10^4$$

$$A = 2,96\ cm^2$$

$$N_{Ed,\ calculé} = \lambda.b_w.x_u.f_{cu} - A.(\sigma_{s1} + \sigma_{s2})$$

$$N_{Ed,\ calculé} = 0,8.1,20.0,03.16,7 - 2,96.10^{-4}.(435 + 428)$$

$$N_{Ed,\ calculé} = 0,216\ MN$$

$N_{Ed,\ calculé} >< N_{Ed,\ réel}$ $\quad N_{Ed,\ calculé} = 0,216\ MN > 0,12633\ MN = N_{Ed,\ réel}$

Comme $N_{Ed,\ calculé} > N_{Ed,\ réel}$, nous allons augmenter la valeur de x_u, ce qui aura pour effet de diminuer la contrainte σ_{s2} (mais faiblement) et d'augmenter la section d'aciers A (fortement) d'où le terme soustractif de $N_{Ed,\ calculé}$ augmente.

Itérations suivantes :

Étant donné la pente du diagramme contraintes-déformations de l'acier, σ_{s2} varie très vite.

Essayons $x_u = 0,045\ m$ et cherchons, par itérations successives à réaliser $N_{Ed,\ calculé} \approx N_{Ed,\ réel}$.

Données :

Géométrie :	b_w	1,2	m	
	h	0,5	m	
	d	0,45	m	
Béton :	f_{ck}	25	MPa	
	f_{cu}	16,7	MPa	
	λ	0,8		
	ε_{cu2}	0,0035		
Aciers :	f_{yd}	435	MPa	
	B	727,27		: valeur ou 0 pour diagramme σ–ε à palier horizontal
	A	433,2		: valeur ou f_{yd} pour diagramme σ–ε à palier horizontal
	ε_{ud}	0,045		: valeur ou infini (1 000 000) pour diagramme σ–ε à palier horizontal
	ε_{yd}	0,002175		
Sollicitations :	M_{EdA}	0,16	mMN	
	$N_{Ed,\,réel}$	0,12633	MN	

$$x_e = \frac{E_s.\varepsilon_{cu2}}{E_s.\varepsilon_{cu2} - f_{yd}}(h-d) \qquad 0$$

Références :	$M_{RS}=\left(\frac{h}{d}-1\right)\left[\left(\lambda+\frac{\lambda^2}{2}\right)-\frac{\lambda^2}{2}.\frac{h}{d}\right]b_w.d^2.f_{cu}$	0,344688																		
	$\alpha_{AB}.d$	0,03247423																		
Calculs itératifs :	x_u	0,03	0,045	0,0375	0,03375	0,031875	0,0328125	0,03328125	0,03304688	0,03292969	0,03287109	0,03290039	0,03288574	0,03289307	0,03289673	0,03289856	0,03289764	0,03289719	0,03289742	
	Pivot	A	B	B	B	A	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	
Piv B	$\varepsilon_{s2}=\varepsilon_{cu2}\frac{h-d-x_u}{x_u}$	0	0,00038889	0,00116667	0,00168519	0	0,00183333	0,00175822	0,00179551	0,00181435	0,00182383	0,00181909	0,00182146	0,00182027	0,00181968	0,00181938	0,00181953	0,0018196	0,00181957	
	$\varepsilon_{s2}=\varepsilon_{cu2}\frac{x_u-(h-d)}{x_u}$	0	-0,00038889	-0,00116667	-0,00168519	0	-0,00183333	-0,00175822	-0,00179551	-0,00181435	-0,00182383	-0,00181909	-0,00182146	-0,00182027	-0,00181968	-0,00181938	-0,00181953	-0,0018196	-0,00181957	
Piv A	$\varepsilon_{s2}=\varepsilon_{ud}\frac{h-d-x_u}{d-x_u}$	0,00214286	0	0	0	0,00195067	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	$\varepsilon_{s2}=\varepsilon_{ud}\frac{x_u-(h-d)}{d-x_u}$	-0,00214286	0	0	0	-0,00195067	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Piv B	$\varepsilon_{s1}=\varepsilon_{cu2}\frac{d-x_u}{x_u}$	0	0,0315	0,0385	0,04316667	0	0,0445	0,04382394	0,04415957	0,04432918	0,04441444	0,04437177	0,0443931	0,04438243	0,0443771	0,04437444	0,04437577	0,04437643	0,0443761	
Piv A	$\varepsilon_{s1}=\varepsilon_{ud}$	0,045	0	0	0	0,045	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Retenu	ε_{s2}	0,00214286	0,00038889	0,00116667	0,00168519	0,00195067	0,00183333	0,00175822	0,00179551	0,00181435	0,00182383	0,00181909	0,00182146	0,00182027	0,00181968	0,00181938	0,00181953	0,0018196	0,00181957	
Retenu	ε_{s1}	0,045	0,0315	0,0385	0,04316667	0,045	0,0445	0,04382394	0,04415957	0,04432918	0,04441444	0,04437177	0,0443931	0,04438243	0,0443771	0,04437444	0,04437577	0,04437643	0,0443761	
Hooke	$\sigma_{s2}=E_s.\varepsilon_{s2}$	428,571429	77,7777778	233,333333	337,037037	390,134529	366,666667	351,643192	359,101655	362,8707	364,7653	363,817156	364,291017	364,054034	363,935582	363,876366	363,905973	363,920777	363,913375	
	$\sigma_{s1}=E_s.\varepsilon_{s1}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Palier	$\sigma_{s2}=A+B.\varepsilon_{s2}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	$\sigma_{s1}=A+B.\varepsilon_{s1}$	465,92715	456,109005	461,199895	464,593822	465,92715	465,563515	465,07184	465,315934	465,439284	465,501289	465,470259	465,485767	465,478011	465,474134	465,472196	465,473165	465,47365	465,473408	
Retenu	σ_{s2}	428,571429	77,7777778	233,333333	337,037037	390,134529	366,666667	351,643192	359,101655	362,8707	364,7653	363,817156	364,291017	364,054034	363,935582	363,876366	363,905973	363,920777	363,913375	
Retenu	σ_{s1}	465,92715	456,109005	461,199895	464,593822	465,92715	465,563515	465,07184	465,315934	465,439284	465,501289	465,470259	465,485767	465,478011	465,474134	465,472196	465,473165	465,47365	465,473408	
$M_{EdA} \le M_{RS}$	$A=\frac{\lambda.b_w.x_u.f_{cu}\left(d-\frac{\lambda}{2}x_u\right)-M_{EdA}}{\sigma_{s2}(2d-h)}$	2,95519467	48,7485257	10,8773571	5,65081962	4,06548833	4,76032457	5,19000279	4,97143226	4,86496471	4,81241855	4,83863482	4,82551252	4,83207012	4,83535158	4,83699298	4,83617223	4,83576189	4,83596706	
	$N_{Ed,\ calculé}=\lambda.b_w.x_u.f_{cu}-A.(\sigma_{s1}+\sigma_{s2})$	0,21661826	-1,88117936	-0,1542686	0,08809286	0,16298912	0,12988142	0,10968967	0,11995388	0,12495887	0,12743034	0,12619717	0,12681439	0,12650594	0,12635159	0,12627439	0,12631299	0,12633229	0,12632264	
	$N_{Ed,\ calculé} \gtrless N_{Ed,\ réel}$	>	<	<	<	>	>	<	<	<	>	<	>	>	>	<	<	>	<	
$M_{EdA} > M_{RS}$	$A=\frac{M_{EdA}-\lambda.b_w.x_u.f_{cu}\left(d-\frac{\lambda}{2}x_u\right)}{\sigma_{s2}(2d-h)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	$N_{Ed,\ calculé}=\lambda.b_w.x_u.f_{cu}-A.(\sigma_{s1}-\sigma_{s2})$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	$N_{Ed,\ calculé} \gtrless N_{Ed,\ réel}$	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	

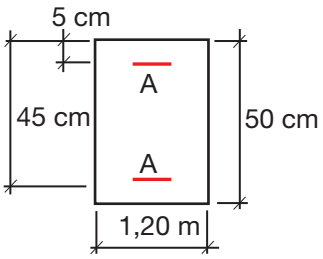
8.3 Pose du problème n° 2 – Cas où $M_{EdA} > M_{RS}$

On considère la section rectangulaire symétrique définie ci-contre.

Matériaux :

- béton : $f_{cu} = 16{,}7$ MPa, $\varepsilon_{cu2} = 0{,}0035$;
- aciers : $f_{yd} = 435$ MPa, $E_s = 2.10^5$ MPa.

Sollicitations : $M_{EdA} = 0{,}450$ mMN, $N_{Ed} = 0{,}12633$ MN.



Nous nous proposons de déterminer les armatures dans les cas suivants :

- aciers avec diagramme σ–ε à palier horizontal ($\varepsilon_{ud} = \infty$) ;
- aciers avec diagramme σ–ε à palier incliné ($\varepsilon_{ud} = 45$ ‰, B = 727,27 et A = 433,20 pour aciers S 500 B).

8.4 Solution

8.4.1 Cas du diagramme σ–ε à palier horizontal

Moment de référence :

$$M_{RS} = \left(\frac{h}{d} - 1\right).\left[\left(\lambda + \frac{\lambda^2}{2}\right) - \frac{\lambda^2}{d}.\frac{h}{d}\right] b_w.d^2.f_{cu}$$

$$M_{RS} = \left(\frac{0{,}50}{0{,}45} - 1\right).\left[\left(0{,}8 + \frac{0{,}8^2}{2}\right) - \frac{0{,}8^2}{2}.\frac{0{,}50}{0{,}45}\right] 1{,}20.0{,}45^2.16{,}7$$

$$M_{RS} = 0{,}345 \text{ mMN}$$

Position de l'axe neutre :

$M_{EdA} >< M_{RS}$ $\quad M_{EdA} = 0{,}450 \text{ mMN} > 0{,}345 \text{ mMN} = M_{RS}$

$x_u > h - d$ et les aciers supérieurs sont comprimés.

Comme $h - d = 0{,}05$ m, prenons $x_u = 0{,}06$ m.

Première itération :

$$x_e = \frac{E_s.\varepsilon_{cu2}}{E_s.\varepsilon_{cu2} - f_{yd}}(h - d) \qquad x_e = \frac{2.10^5.3{,}5.10^{-3}}{2.10^5.3{,}5.10^{-3} - 435}(0{,}50 - 0{,}45) = 0{,}132 \text{ m}$$

$x_u >< x_e$ $\quad x_u = 0{,}06 \text{ m} < 0{,}132 \text{ m} = x_e$

$$\Rightarrow \quad \sigma_{s2} = E_s.\varepsilon_{cu2}\frac{x_u - (h - d)}{x_u}$$

$$\sigma_{s2} = 2.10^5.0,0035\frac{0,06-(0,50-0,45)}{0,06} = 117 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu2}\frac{d-x_u}{x_u} \qquad \varepsilon_{s1} = 0,0035\frac{0,45-0,06}{0,06} = 0,0228$$

$$\varepsilon_{s1} >< \varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} \qquad \varepsilon_{s1} = 0,0228 > 0,00218 = \varepsilon_{yd} = \frac{435}{2.10^5}$$

$$\Rightarrow \quad \sigma_{s1} = f_{yd} = 435 \text{ MPa}$$

$$A = \frac{M_{EdA} - \lambda.b_w.x_u.f_{cu}\left(d-\frac{\lambda}{2}x_u\right)}{\sigma_{s2}(2d-h)}$$

$$A = \frac{0,450 - 0,8.1,20.0,06.16,7\left(0,45-\frac{0,8}{2}\,0,06\right)}{117\ (2.0,45-0,50)}10^4$$

$$A = 8,59 \text{ cm}^2$$

$$N_{Ed,\ calculé} = \lambda.b_w.x_u.f_{cu} - A.\left(\sigma_{s1}-\sigma_{s2}\right)$$

$$N_{Ed,\ calculé} = 0,8.1,20.0,06.16,7 - 8,59.10^{-4}.(435-117)$$

$$N_{Ed,\ calculé} = 0,689 \text{ MN}$$

$N_{Ed,\ calculé} >< N_{Ed,\ réel}$ $\qquad N_{Ed,\ calculé} = 0,689 \text{ MN} > 0,12633 \text{ MN} = N_{Ed,\ réel}$

Comme $N_{Ed,\ calculé} > N_{Ed,\ réel}$, nous allons diminuer la valeur de x_u, ce qui aura pour effet de diminuer la contrainte σ_{s2} (mais faiblement) et d'augmenter la section d'aciers A (fortement) d'où le terme soustractif de $N_{Ed,\ calculé}$ augmente.

Itérations suivantes :

Étant donné la pente du diagramme contraintes-déformations de l'acier, σ_{s2} varie très vite.

Essayons x_u = 0,055 m et cherchons, par itérations successives à réaliser $N_{Ed,\ calculé} \approx N_{Ed,\ réel}$.

Données :

Géométrie :	b_w	1,2	m	
	h	0,5	m	
	d	0,45	m	
Béton :	f_{ck}	25	MPa	
	f_{cu}	16,7	MPa	
	λ	0,8		
	ε_{cu2}	0,0035		
Aciers :	f_{yd}	435	MPa	
	B	0		: valeur ou 0 pour diagramme σ–ε à palier horizontal
	A	435		: valeur ou f_{yd} pour diagramme σ–ε à palier horizontal
	ε_{ud}	1000000		: valeur ou infini (1 000 000) pour diagramme σ–ε à palier horizontal
	ε_{yd}	0,002175		
Sollicitations :	M_{EdA}	0,45	mMN	
	$N_{Ed,\,réel}$	0,12633	MN	

$$x_e = \frac{E_s.\varepsilon_{cu2}}{E_s.\varepsilon_{cu2} - f_{yd}}(h-d) \quad 0{,}13207547$$

Références :	$M_{RS}=\left(\frac{h}{d}-1\right)\left[\left(\lambda+\frac{\lambda^2}{2}\right)-\frac{\lambda^2}{2}.\frac{h}{d}\right]b_w.d^2.f_{cu}$	0,344688																										
	$\alpha_{AB}.d$	1,575E-09																										
Calculs itératifs :	x_u	0,06	0,055	0,0575	0,05625	0,058125	0,0565625	0,05578125	0,05617188	0,05597656	0,05607422	0,05612305	0,05609863	0,05608643	0,05609253	0,05609558	0,05609406	0,05609329	0,05609367	0,05609348	0,05609339	0,05609344	0,05609346	0,05609345				
	Pivot	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B				
Piv B	$\varepsilon_{s2}=\varepsilon_{cu2}\frac{h-d-x_u}{x_u}$	-0,00058333	-0,00031818	-0,00045652	-0,00038889	-0,00048925	-0,00040608	-0,00036275	-0,00038456	-0,00037369	-0,00037914	-0,00038185	-0,00038049	-0,00037982	-0,00038015	-0,00038032	-0,00038024	-0,0003802	-0,00038022	-0,00038021	-0,0003802	-0,00038021	-0,00038021	-0,00038021				
	$\varepsilon_{s2}=\varepsilon_{cu2}\frac{x_u-(h-d)}{x_u}$	0,00058333	0,00031818	0,00045652	0,00038889	0,00048925	0,00040608	0,00036275	0,00038456	0,00037369	0,00037914	0,00038185	0,00038049	0,00037982	0,00038015	0,00038032	0,00038024	0,0003802	0,00038022	0,00038021	0,0003802	0,00038021	0,00038021	0,00038021				
Piv A	$\varepsilon_{s2}=\varepsilon_{ud}\frac{h-d-x_u}{d-x_u}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	$\varepsilon_{s2}=\varepsilon_{ud}\frac{x_u-(h-d)}{d-x_u}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Piv B	$\varepsilon_{s1}=\varepsilon_{cu2}\frac{d-x_u}{x_u}$	0,02275	0,02513636	0,0238913	0,0245	0,02359677	0,0243453	0,02473529	0,02453894	0,02463678	0,02458777	0,02456334	0,02457555	0,02458166	0,02457861	0,02457708	0,02457784	0,02457822	0,02457803	0,02457813	0,02457818	0,02457815	0,02457814	0,02457815				
Piv A	$\varepsilon_{s1}=\varepsilon_{ud}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Retenu	ε_{s2}	0,00058333	0,00031818	0,00045652	0,00038889	0,00048925	0,00040608	0,00036275	0,00038456	0,00037369	0,00037914	0,00038185	0,00038049	0,00037982	0,00038015	0,00038032	0,00038024	0,0003802	0,00038022	0,00038021	0,0003802	0,00038021	0,00038021	0,00038021				
Retenu	ε_{s1}	0,02275	0,02513636	0,0238913	0,0245	0,02359677	0,0243453	0,02473529	0,02453894	0,02463678	0,02458777	0,02456334	0,02457555	0,02458166	0,02457861	0,02457708	0,02457784	0,02457822	0,02457803	0,02457813	0,02457818	0,02457815	0,02457814	0,02457815				
Hooke	$\sigma_{s2}=E_s.\varepsilon_{s2}$	116,666667	63,6363636	91,3043478	77,7777778	97,8494624	81,2154696	72,5490196	76,9123783	74,7383112	75,8272379	76,3702801	76,0988772	75,9630871	76,0309895	76,0649352	76,0479628	76,0394763	76,0437196	76,041598	76,0405371	76,0410675	76,0413327	76,0412001				
	$\sigma_{s1}=E_s.\varepsilon_{s1}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Palier	$\sigma_{s2}=A+B.\varepsilon_{s2}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	$\sigma_{s1}=A+B.\varepsilon_{s1}$	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435				
Retenu	σ_{s2}	116,666667	63,6363636	91,3043478	77,7777778	97,8494624	81,2154696	72,5490196	76,9123783	74,7383112	75,8272379	76,3702801	76,0988772	75,9630871	76,0309895	76,0649352	76,0479628	76,0394763	76,0437196	76,041598	76,0405371	76,0410675	76,0413327	76,0412001				
Retenu	σ_{s1}	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435				
$M_{EdA} \le M_{RS}$	$A=\frac{\lambda.b_w.x_u.f_{cu}\left(d-\frac{\lambda}{2}x_u\right)-M_{EdA}}{\sigma_{s2}(2d-h)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	$N_{Ed,\ calculé}=\lambda.b_w.x_u.f_{cu}-A.(\sigma_{s1}+\sigma_{s2})$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	$N_{Ed,\ calculé} \gtrless N_{Ed,\ réel}$	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<				
$M_{EdA} > M_{RS}$	$A=\frac{M_{EdA}-\lambda.b_w.x_u.f_{cu}\left(d-\frac{\lambda}{2}x_u\right)}{\sigma_{s2}(2d-h)}$	8,61901714	28,5240686	15,4358257	20,725875	13,3697068	19,2241935	23,2689168	21,1239735	22,1627961	21,6353782	21,3777221	21,5060558	21,5705927	21,5382933	21,5221668	21,5302281	21,5342602	21,532244	21,5332521	21,5337561	21,5335041	21,5333781	21,5334411				
	$N_{Ed,\ calculé}=\lambda.b_w.x_u.f_{cu}-A.(\sigma_{s1}-\sigma_{s2})$	0,68754795	-0,17752018	0,39131738	0,16142569	0,48109962	0,22668777	0,05090083	0,14412416	0,09897561	0,12189802	0,13309604	0,12751852	0,12471368	0,12611745	0,12681832	0,12646797	0,12629273	0,12638035	0,12633654	0,12631464	0,12632559	0,12633107	0,12632833				
	$N_{Ed,\ calculé} \gtrless N_{Ed,\ réel}$	>	<	>	>	>	>	<	>	<	<	>	>	<	<	>	>	<	>	>	<	<	>	<				

8.4.2 Cas du diagramme σ–ε à palier incliné

Moment de référence :

$$M_{RS} = \left(\frac{h}{d} - 1\right).\left[\left(\lambda + \frac{\lambda^2}{2}\right) - \frac{\lambda^2}{d}.\frac{h}{d}\right] b_w.d^2.f_{cu}$$

$$M_{RS} = \left(\frac{0{,}50}{0{,}45} - 1\right).\left[\left(0{,}8 + \frac{0{,}8^2}{2}\right) - \frac{0{,}8^2}{2}.\frac{0{,}50}{0{,}45}\right] 1{,}20.0{,}45^2.16{,}7$$

$$M_{RS} = 0{,}345 \text{ mMN}$$

Position de l'axe neutre :

$M_{EdA} >< M_{RS}$ $\quad M_{EdA} = 0{,}450 \text{ mMN} > 0{,}345 \text{ mMN} = M_{RS}$

$x_u > h - d$ et les aciers supérieurs sont comprimés.

Comme $h - d = 0{,}05$ m, prenons $x_u = 0{,}06$ m.

Première itération :

$$x_{AB} = \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{cu2} + \varepsilon_{ud}} d \qquad x_{AB} = \frac{3{,}5}{3{,}5 + 45} 0{,}45 = 0{,}032 \text{ m}$$

$x_u >< x_{AB}$ $\quad x_u = 0{,}06 \text{ m} > 0{,}032 \text{ m} = x_{AB} \Rightarrow$ Pivot B

$$x_e = \frac{E_s.\varepsilon_{cu2}}{E_s.\varepsilon_{cu2} - f_{yd}}(h - d) \qquad x_e = \frac{2.10^5.3{,}5.10^{-3}}{2.10^5.3{,}5.10^{-3} - 435}(0{,}50 - 0{,}45) = 0{,}132 \text{ m}$$

$x_u >< x_e$ $\quad x_u = 0{,}06 \text{ m} < 0{,}132 \text{ m} = x_e$

$$\Rightarrow \quad \sigma_{s2} = E_s.\varepsilon_{cu2} \frac{x_u - (h - d)}{x_u}$$

$$\sigma_{s2} = 2.10^5.0{,}0035 \frac{0{,}06 - (0{,}50 - 0{,}45)}{0{,}06} = 117 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu2} \frac{d - x_u}{x_u} \qquad \varepsilon_{s1} = 0{,}0035 \frac{0{,}45 - 0{,}06}{0{,}06} = 0{,}0228$$

$$\varepsilon_{s1} >< \varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} \qquad \varepsilon_{s1} = 0{,}0228 > 0{,}00218 = \varepsilon_{yd} = \frac{435}{2.10^5}$$

$$\Rightarrow \quad \sigma_{s1} = A + B.\varepsilon_{s1} = 433{,}2 + 727{,}27.0{,}0228$$

$$\sigma_{s1} = 450 \text{ MPa}$$

$$A = \frac{M_{EdA} - \lambda.b_w.x_u.f_{cu}\left(d - \frac{\lambda}{2}x_u\right)}{\sigma_{s2}(2d - h)}$$

$$A = \frac{0{,}450 - 0{,}8.1{,}20.0{,}06.16{,}7\left(0{,}45 - \frac{0{,}8}{2}\,0{,}06\right)}{117(2.0{,}45 - 0{,}50)}10^4$$

$$A = 8{,}59\ \text{cm}^2$$

$$N_{Ed,\ calculé} = \lambda.b_w.x_u.f_{cu} - A.\left(\sigma_{s1} - \sigma_{s2}\right)$$

$$N_{Ed,\ calculé} = 0{,}8.1{,}20.0{,}06.16{,}7 - 8{,}59.10^{-4}.(450 - 117)$$

$$N_{Ed,\ calculé} = 0{,}475\ \text{MN}$$

$N_{Ed,\ calculé} >< N_{Ed,\ réel}$ $\quad N_{Ed,\ calculé} = 0{,}475\ \text{MN} > 0{,}12633\ \text{MN} = N_{Ed,\ réel}$

Comme $N_{Ed,\ calculé} > N_{Ed,\ réel}$, nous allons diminuer la valeur de x_u, ce qui aura pour effet de diminuer la contrainte σ_{s2} (mais faiblement) et d'augmenter la section d'aciers A (fortement) d'où le terme soustractif de $N_{Ed,\ calculé}$ augmente.

Itérations suivantes :

Étant donné la pente du diagramme contraintes-déformations de l'acier, σ_{s2} varie très vite.

Essayons $x_u = 0{,}055$ m et cherchons, par itérations successives à réaliser $N_{Ed,\ calculé} \approx N_{Ed,\ réel}$.

Données :

Géométrie :	b_w	1,2	m	
	h	0,5	m	
	d	0,45	m	
Béton :	f_{ck}	25	MPa	
	f_{cu}	16,7	MPa	
	λ	0,8		
	ε_{cu2}	0,0035		
Aciers :	f_{yd}	435	MPa	
	B	727,27		: valeur ou 0 pour diagramme σ–ε à palier horizontal
	A	433,2		: valeur ou f_{yd} pour diagramme σ–ε à palier horizontal
	ε_{ud}	0,045		: valeur ou infini (1 000 000) pour diagramme σ–ε à palier horizontal
	ε_{yd}	0,002175		
Sollicitations :	M_{EdA}	0,45	mMN	
	$N_{Ed,\,réel}$	0,12633	MN	

$$x_e = \frac{E_s.\varepsilon_{cu2}}{E_s.\varepsilon_{cu2} - f_{yd}}(h - d) \quad 0{,}132075472$$

Références :	$M_{RS} = \left(\frac{h}{d} - 1\right)\left[\left(\lambda + \frac{\lambda^2}{2}\right) - \frac{\lambda^2}{2}.\frac{h}{d}\right] b_w . d^2 . f_{cu}$	0,344688																		
	$\alpha_{AB} . d$	0,032474227																		
Calculs itératifs :	x_u	0,06	0,055	0,0575	0,05625	0,055625	0,0559375	0,05609375	0,056171875	0,056210938	0,056230469	0,056240234	0,056245117	0,056242676	0,056241455	0,056242065	0,05624176	0,056241608	0,056241684	
	Pivot	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	
Piv B	$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu2} \frac{h - d - x_u}{x_u}$	-0,000583333	-0,000318182	-0,000456522	-0,000388889	-0,000353933	-0,000371508	-0,000380223	-0,000384562	-0,000386727	-0,000387808	-0,000388349	-0,000388619	-0,000388484	-0,000388416	-0,00038845	-0,000388433	-0,000388425	-0,000388429	
	$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu2} \frac{x_u - (h - d)}{x_u}$	0,000583333	0,000318182	0,000456522	0,000388889	0,000353933	0,000371508	0,000380223	0,000384562	0,000386727	0,000387808	0,000388349	0,000388619	0,000388484	0,000388416	0,00038845	0,000388433	0,000388425	0,000388429	
Piv A	$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{ud} \frac{h - d - x_u}{d - x_u}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{ud} \frac{x_u - (h - d)}{d - x_u}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Piv B	$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu2} \frac{d - x_u}{x_u}$	0,02275	0,025136364	0,023891304	0,0245	0,024814607	0,024656425	0,024577994	0,024538943	0,024519458	0,024509726	0,024504862	0,024502431	0,024503646	0,024504254	0,02450395	0,024504102	0,024504178	0,02450414	
Piv A	$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{ud}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Retenu	ε_{s2}	0,000583333	0,000318182	0,000456522	0,000388889	0,000353933	0,000371508	0,000380223	0,000384562	0,000386727	0,000387808	0,000388349	0,000388619	0,000388484	0,000388416	0,00038845	0,000388433	0,000388425	0,000388429	
Retenu	ε_{s1}	0,02275	0,025136364	0,023891304	0,0245	0,024814607	0,024656425	0,024577994	0,024538943	0,024519458	0,024509726	0,024504862	0,024502431	0,024503646	0,024504254	0,02450395	0,024504102	0,024504178	0,02450414	
Hooke	$\sigma_{s2} = E_s . \varepsilon_{s2}$	116,6666667	63,63636364	91,30434783	77,77777778	70,78651685	74,30167598	76,04456825	76,9123783	77,34537874	77,56165335	77,66973433	77,72376074	77,69674871	77,68324181	77,68999533	77,68661859	77,68493021	77,6857744	
	$\sigma_{s1} = E_s . \varepsilon_{s1}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Palier	$\sigma_{s2} = A + B.\varepsilon_{s2}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	$\sigma_{s1} = A + B.\varepsilon_{s1}$	449,7453925	451,4809232	450,5754289	451,018115	451,246919	451,1318779	451,074838	451,0464371	451,0322662	451,0251881	451,021651	451,0198828	451,0207669	451,0212089	451,0209879	451,0210984	451,0211536	451,021126	
Retenu	σ_{s2}	116,6666667	63,63636364	91,30434783	77,77777778	70,78651685	74,30167598	76,04456825	76,9123783	77,34537874	77,56165335	77,66973433	77,72376074	77,69674871	77,68324181	77,68999533	77,68661859	77,68493021	77,6857744	
Retenu	σ_{s1}	449,7453925	451,4809232	450,5754289	451,018115	451,246919	451,1318779	451,074838	451,0464371	451,0322662	451,0251881	451,021651	451,0198828	451,0207669	451,0212089	451,0209879	451,0210984	451,0211536	451,021126	
$M_{EdA} \leq M_{RS}$	$A = \frac{\lambda . b_w . x_u . f_{cu} \left(d - \frac{\lambda}{2} x_u\right) - M_{EdA}}{\sigma_{s2} (2d - h)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$N_{Ed,\ calculé} = \lambda . b_w . x_u . f_{cu} - A.(\sigma_{s1} + \sigma_{s2})$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$N_{Ed,\ calculé} >< N_{Ed,\ réel}$	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	
$M_{EdA} > M_{RS}$	$A = \frac{M_{EdA} - \lambda . b_w . x_u . f_{cu} \left(d - \frac{\lambda}{2} x_u\right)}{\sigma_{s2} (2d - h)}$	8,619017143	28,52406857	15,43582571	20,725875	24,20697756	22,37842396	21,53184083	21,1239735	20,92372618	20,82450389	20,77511562	20,75047689	20,76279165	20,76895248	20,76587177	20,76741205	20,76818225	20,76779715	
	$N_{Ed,\ calculé} = \lambda . b_w . x_u . f_{cu} - A.(\sigma_{s1} - \sigma_{s2})$	0,674838875	-0,224530481	0,367275421	0,128226743	-0,029199642	0,053503398	0,091785793	0,110227706	0,119281539	0,123767592	0,126000514	0,127114463	0,126557698	0,126279158	0,126418441	0,126348803	0,126313981	0,126331392	
	$N_{Ed,\ calculé} >< N_{Ed,\ réel}$	>	<	>	>	<	<	<	<	<	<	<	>	>	<	>	>	<	>	

A5 Vérification à l'ELU d'une section rectangulaire dont on connaît les armatures

On distingue les deux cas ci-après.

1. Section sans aciers comprimés ($A_{s2} = 0$)

1.1 Aciers avec diagramme σ–ε à palier horizontal

1/ Calculer μ_{lu} et en déduire $M_{lu} = \mu_{lu}.b_w.d^2.f_{cu}$.

2/ Si $M_{Ed} \leq M_{lu}$, le fait d'avoir $A_{s2} = 0$ est correct. Sinon, il faut prévoir des aciers comprimés et, comme la section n'en comporte pas, tout le dimensionnement (détermination de A_{s2}, puis de A_{s1}) est à reprendre.

3/ En déduire la position de l'axe neutre par l'équation d'équilibre des forces :

$$\lambda.b_w.x_u.f_{cu} - A_{s1}.f_{yd} = 0 \quad \Rightarrow \quad x_u = \frac{A_{s1}.f_{yd}}{\lambda.b_w.f_{cu}}.$$

4/ Calculer la valeur du bras de levier : $z_c = d - \frac{\lambda}{2} x_u$.

5/ En déduire le moment résistant à l'ELU : $M_{Ru} = A_{s1}.f_{yd}.z_c$.

6/ Il faut vérifier : $M_{Ru} \geq M_{Ed}$, sinon la section d'armatures tendues est insuffisante.

1.2 Aciers avec diagramme σ–ε à palier incliné

1/ Calculer μ_{lu} et en déduire $M_{lu} = \mu_{lu}.b_w.d^2.f_{cu}$.

2/ Si $M_{Ed} \leq M_{lu}$, le fait d'avoir $A_{s2} = 0$ est correct. Sinon, il faut prévoir des aciers comprimés et, comme la section n'en comporte pas, tout le dimensionnement (détermination de A_{s2}, puis de A_{s1}) est à reprendre.

3/ En déduire par approximations successives la position de l'axe neutre par l'équation d'équilibre des forces :

a) $\lambda.b_w.x_u.f_{cu} - A_{s1}.\sigma_{s1} = 0 \quad \Rightarrow \quad x_u = \dfrac{A_{s1}.\sigma_{s1}}{\lambda.b_w.f_{cu}}$

avec $\sigma_{s1} = f_{yd}$

b) Si $x_u \leq \alpha_{AB}.d \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{s1} = \varepsilon_{ud} \quad \Rightarrow$

$$\sigma'_{s1} = \begin{cases} 454 \text{ MPa : S 500 A,} \\ 466 \text{ MPa : S 500 B,} \\ 493 \text{ MPa : S 500 C.} \end{cases}$$

Si $x_u > \alpha_{AB}.d \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu2}\dfrac{1 - x_u}{x_u} \quad \Rightarrow$

$$\sigma'_{s1} = \begin{cases} E_s.\varepsilon_{s1} \text{ si } \varepsilon_{s1} < \varepsilon_{yd} = \dfrac{f_{yd}}{E_s}, \\ A + B.\varepsilon_{s1} \text{ si } \varepsilon_{s1} \geq \varepsilon_{yd} = \dfrac{f_{yd}}{E_s}. \end{cases}$$

les coefficients A et B sont ceux figurant au § 2.4.2.1, chapitre 3 : « Béton armé – Généralités », p. 53.

c) comparer σ'_{s1} à la contrainte utilisée précédemment pour calculer x_u et recommencer les étapes a/ et b/ avec σ'_{s1} jusqu'à ce que la valeur de la contrainte des aciers tendus se stabilise.

4/ Calculer la valeur du bras de levier : $z_c = d - \dfrac{\lambda}{2}x_u$.

5/ En déduire le moment résistant à l'ELU : $M_{Ru} = A_{s1}.\sigma_{s1}.z_c$.

6/ Il faut vérifier : $M_{Ru} \geq M_{Ed}$, sinon la section d'armatures tendues est insuffisante.

2. Section avec aciers comprimés ($A_{s2} \neq 0$)

2.1 Aciers avec diagramme σ–ε à palier horizontal

Peu importe, dans ce cas, que M_{Ed} soit supérieur ou non à M_{lu}. Le mode opératoire est le suivant :

1/ calculer la contrainte équivalente des aciers comprimés à l'ELU :

a) si σ_c est limitée :

$$\sigma_{s2,\,e} = 0{,}6.\alpha_e.\gamma.f_{ck} - \delta'\left(A.f_{ck} + B\right) \le 435 \text{ MPa } (S\,500)$$

les coefficients A et B sont ceux figurant au § 3.3.3, chapitre 7 : « Flexion simple », p. 175, pour les aciers avec diagramme σ–ε à palier horizontal.

b) si σ_c n'est pas limitée :

$$\alpha_1 = \frac{1}{\lambda}\left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{lu}}\right] \text{ avec } \mu_{lu} = \mu_{ls}$$

$$\sigma_{s2,\,e} = \text{Min}\begin{cases} E_s.\nu_{s2,\,u} = E_s\,\dfrac{\alpha_1 - \delta'}{\alpha_1} \text{ où } \delta' = \dfrac{d'}{d} \\ f_{yd} \end{cases}$$

2/ si $M_{Ed} > M_{lu}$, vérifier que la section d'aciers comprimés convient :

$$A_{s2} \ge \frac{M_{Ed} - M_{lu}}{(d - d')\sigma_{s2,\,e}}.$$

3/ déterminer la position de l'axe neutre par l'équation d'équilibre des forces :

$$\lambda.b_w.x_u.f_{cu} - A_{s1}.f_{yd} + A_{s2}.\sigma_{s2,\,e} = 0 \quad \Rightarrow \quad x_u = \frac{A_{s1}.f_{yd} - A_{s2}.\sigma_{s2,\,e}}{\lambda.b_w.f_{cu}}.$$

4/ calculer la valeur du bras de levier du béton seul : $z_c = d - \dfrac{\lambda}{2}x_u$.

5/ en déduire le moment résistant à l'ELU (par rapport aux aciers tendus) :

$$M_{Ru} = \lambda.b_w.x_u.f_{cu}.z_c + A_{s2}.\sigma_{s2,\,e}\left[d - d'\right].$$

6/ il faut vérifier : $M_{Ru} \ge M_{Ed}$, sinon la section d'armatures (tendues et/ou comprimées) est insuffisante.

2.2 Aciers avec diagramme σ–ε à palier incliné

Peu importe, dans ce cas, que M_{Ed} soit supérieur ou non à M_{lu}. Le mode opératoire est le suivant :

1/ calculer la contrainte équivalente des aciers comprimés à l'ELU :

a) si σ_c est limitée :

$$\sigma_{s2,\,e} = 0{,}6.\alpha_e.\gamma.f_{ck} - \delta'\left(A.f_{ck} + B\right) \le 435 \text{ MPa } (S\,500)$$

les coefficients A et B sont ceux figurant au § 3.3.3, chapitre 7 : « Flexion simple », p. 175, pour les aciers avec diagramme σ–ε à palier incliné.

b/ si σ_c n'est pas limitée :

$$\alpha_l = \frac{1}{\lambda}\left[1 - \sqrt{1 - 2.\mu_{lu}}\right] \text{ avec } \mu_{lu} = \mu_{ls}$$

$$\nu_{s2,\,u} = \varepsilon_{cu2}\,\frac{\alpha_l - \delta'}{\alpha_l} \text{ où } \delta' = \frac{d'}{d}$$

$$\sigma_{s2,\,e} = \text{Min}\begin{cases} E_s.\nu_{s2,\,u} = E_s.\varepsilon_{cu2}\,\dfrac{\alpha_l - \delta'}{\alpha_l} \text{ où } \delta' = \dfrac{d'}{d} \\ A + B.\nu_{s2,\,u} \end{cases}$$

les coefficients A et B sont ceux figurant au § 2.4.2.1, chapitre 3 : « Béton armé – Généralités », p. 69.

2/ si $M_{Ed} > M_{lu}$, vérifier que la section d'aciers comprimés convient :

$$A_{s2} \geq \frac{M_{Ed} - M_{lu}}{(d - d')\sigma_{s2,\,e}}.$$

3/ déterminer par approximations successives la position de l'axe neutre par l'équation d'équilibre des forces :

a) $\lambda.b_w.x_u.f_{cu} - A_{s1}.\sigma_{s1} + A_{s2}.\sigma_{s2} = 0 \Rightarrow x_u = \dfrac{A_{s1}.\sigma_{s1} - A_{s2}.\sigma_{s2}}{\lambda.b_w.f_{cu}}$ avec $\sigma_{s1} = f_{yd}$ et $\sigma_{s2} = \sigma_{s2,\,e}$

b) Si $x_u \leq \alpha_{AB}.d \Rightarrow \varepsilon_{s1} = \varepsilon_{ud} \Rightarrow \sigma'_{s1} = \begin{cases} 454 \text{ MPa : S 500 A,} \\ 466 \text{ MPa : S 500 B,} \\ 493 \text{ MPa : S 500 C.} \end{cases}$

$$\text{Si } x_u > \alpha_{AB}.d \Rightarrow \varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu2}\,\frac{1 - x_u}{x_u} \Rightarrow$$

$$\sigma'_{s1} = \begin{cases} E_s.\varepsilon_{s1} \text{ si } \varepsilon_{s1} < \varepsilon_{yd} = \dfrac{f_{yd}}{E_s}, \\ A + B.\varepsilon_{s1} \text{ si } \varepsilon_{s1} \geq \varepsilon_{yd} = \dfrac{f_{yd}}{E_s}. \end{cases}$$

les coefficients A et B sont ceux figurant au § 2.4.2.1, chapitre 3 : « Béton armé – Généralités », p. 69,

c) comparer σ'_{s1} à la contrainte utilisée précédemment pour calculer x_u et recommencer les étapes a) et b) avec σ'_{s1} jusqu'à ce que la valeur de la contrainte des aciers tendus se stabilise.

4/ calculer la valeur du bras de levier du béton seul : $z_c = d - \dfrac{\lambda}{2}x_u$.

5/ en déduire le moment résistant à l'ELU (par rapport aux aciers tendus) :

$$M_{Ru} = \lambda.b_w.x_u.f_{cu}.z_c + A_{s2}.\sigma_{s2,\,e}\left[d - d'\right].$$

6/ il faut vérifier : $M_{Ru} \geq M_{Ed}$, sinon la section d'armatures (tendues et/ou comprimées) est insuffisante.

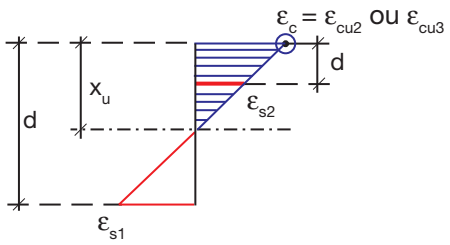
2.3 Remarque pour les aciers avec diagramme contraintes-déformations à palier horizontal

2.3.1 Remarque préliminaire

La condition pour que la contrainte des armatures comprimées soit obtenue par la droite de Hooke du diagramme contraintes-déformations des aciers est obtenue de la façon suivante :

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu2}\,\frac{x_u - d'}{x_u}$$

$$\sigma_{s2} = E_s.\varepsilon_{s2} = E_s.\varepsilon_{cu2}\,\frac{x_u - d'}{x_u}$$



D'où, pour que la contrainte appartienne à la droite de Hooke, il faut que :

$$\sigma_{s2} = E_s.\varepsilon_{cu2}\,\frac{x_u - d'}{x_u} \leq f_{yd} \quad \Rightarrow \quad x_u \leq \frac{E_s.\varepsilon_{cu2}}{E_s.\varepsilon_{cu2} - f_{yd}}\,d'$$

Ce qui conduit, pour les cas courants où l'on a un béton de classe au plus égale à C50/60 à :

$$E_s.\varepsilon_{cu2} = 2.10^5.3,5.10^{-3} = 700 \quad \Rightarrow \quad x_u \leq \frac{700}{700 - f_{yd}}\,d'$$

2.3.2 Méthode

1/ Se donner une position de départ de l'axe neutre :

$$\left.\begin{array}{l} \lambda.b_w.x_{u1}.f_{cu} + A_{s2}.\sigma_{s2} - A_{s1}.\sigma_{s1} = 0 \\ \sigma_{s1} = \sigma_{s2} = f_{yd} \end{array}\right\} \quad \Rightarrow \quad x_{u1} = \frac{(A_{s1} - A_{s2}).f_{yd}}{\lambda.b_w.f_{cu}}$$

Si $x_{u1} \geq \dfrac{700.d'}{700 - f_{yd}}$, prendre :

$$M_{Ru} = \lambda.b_w.x_{u1}.f_{cu}\left(d - \frac{\lambda}{2}x_{u1}\right) + A_{s2}.f_{yd}(d - d')\,.$$

Puis faire la vérification de l'étape 4 ci-dessous.

3/ Si $x_{u1} < \dfrac{700.d'}{700 - f_{yd}}$:

a) choisir $x_{u2} < x_{u1}$ et calculer :

$\sigma_{s2,\,u2} = 700\,\dfrac{x_{u2} - d'}{x_{u2}}$ si $x_{u2} \geq \alpha_{AB}.d$, ce qui est toujours le cas pour les aciers avec diagramme σ–ε à palier horizontal,

$\sigma_{s2,\,u2} = 2\ .10^5.\varepsilon_{ud}\,\dfrac{x_{u2} - d'}{d - x_{u2}}$ si $x_{u2} < \alpha_{AB}.d$,

b) en déduire la nouvelle position de l'axe neutre :

$$x_{u3} = \frac{A_{s1}.f_{yd} - A_{s2}.\sigma_{s2,\,u2}}{\lambda.b_w.f_{cu}}$$

c) recommencer avec cette valeur le calcul de $\sigma_{s2,\,u3}$, d'où x_{u4}, etc., jusqu'à trouver $x_{ui+1} \approx x_{ui}$

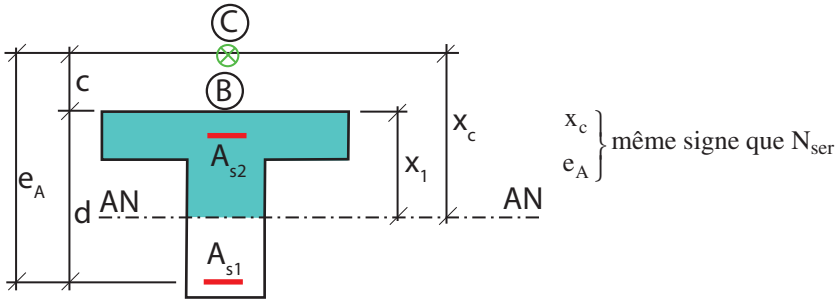
d) d'où la valeur du moment résistant à l'ELU par rapport aux aciers tendus :

$$M_{Ru} = \lambda.b_w.x_{ui}.f_{cu}\left(d - \frac{\lambda}{2}x_{ui}\right) + A_{s2}.\sigma_{s2,\,ui}[d - d'].$$

4/ il faut vérifier : $M_{Ru} \geq M_{Ed}$, sinon la section d'armatures (tendues et/ou comprimées) est insuffisante.

A6 Flexion composée – Vérification des contraintes à l'ELS pour une section quelconque

1. Notations



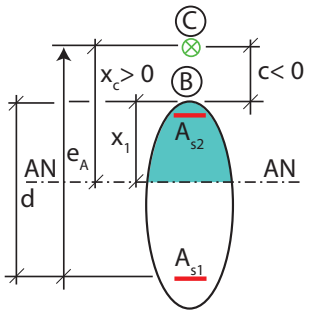
x_1 = distance toujours positive de la fibre la plus comprimée B de la section à l'axe neutre,

x_c = distance du centre de pression C à l'axe neutre, de même signe que N_{ser},

e_A = distance du centre de gravité des aciers tendus au centre de pression C, de même signe que N_{ser},

c = distance de la fibre la plus comprimée B de la section au centre de pression C définie par :

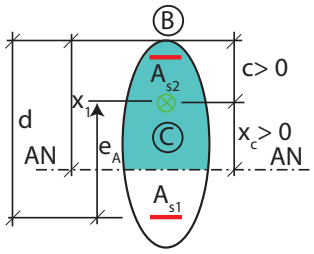
$c = d - e_A$



$N_{ser} > 0$

$x_c > 0$

$c < 0$



$N_{ser} > 0$

$y_c < 0$

$c > 0$

Compression

⇓

$N_{ser} > 0$

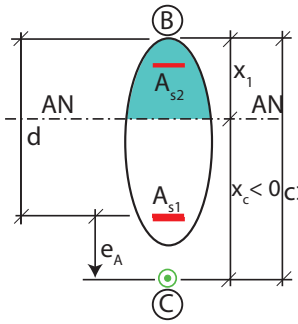
$x_c > 0$

$c > 0$ si $e_A < d$

(C dans la section)

$c < 0$ si $e_A > d$

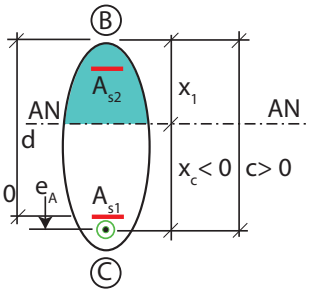
(C hors section)



$N_{ser} < 0$

$x_c < 0$

$c > 0$



$N_{ser} < 0$

$x_c < 0$

$c > 0$

Traction

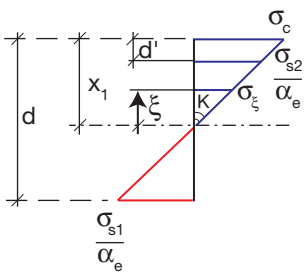
⇓

$N_{ser} < 0$

$x_c < 0$

$c > 0$

On en déduit :



$x_1 = x_c + c$,

K = coefficient angulaire du diagramme des contraintes,

$\sigma_\xi = K.\xi$,

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{c,\,eff}}$$

2. Caractéristiques géométriques des sections

S_{cf} = moment statique, par rapport à l'axe neutre, de la section homogène réduite A_{cf} :

$$S_{cf} = \int_{A_{cf}} \xi.\alpha_e.dA_{cf}$$

avec :

$$\alpha_e = \begin{cases} 1 \text{ si } dA_{cf} = \text{fibre de béton comprimé} \\ \alpha_e \text{ si } dA_{cf} = \text{fibre d'acier} \end{cases}$$

Remarque

Comme la résultante des contraintes normales n'est pas nulle, le moment statique par rapport à l'axe neutre de la section homogène réduite totale ($A_{cf} = (A_c - A_{ct}) + \alpha_e.A_{s1} + \alpha_e.A_{s2}$) n'est pas nul ($S_{cf}$ est différent de S_1 utilisé au § 1.1.3, chapitre 8 : « Effort tranchant », p. 293).

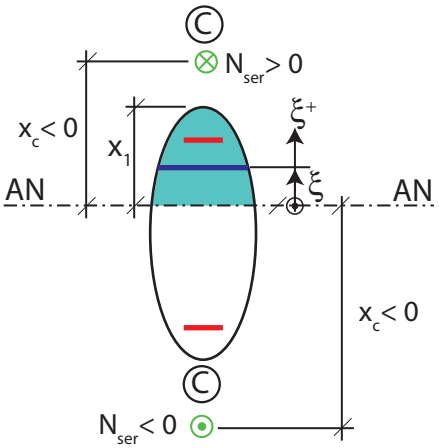
I_{cf} = moment d'inertie, par rapport à l'axe neutre, de la section homogène réduite A_{cf} :

$$I_{cf} = \int_{A_{cf}} \xi^2.\alpha_e.dA_{cf}$$

S_c = moment statique, par rapport à la parallèle à l'axe neutre passant par C, de la section homogène réduite A_{cf} :

$$S_c = -\int_{A_{cf}} (x_c - \xi)\alpha_e.dA_{cf} = -x_c \int_{A_{cf}} \alpha_e.dA_{cf} + S_{cf}$$

le signe négatif provenant du fait que l'aire est au-dessous de l'axe passant par C lorsque $x_c > 0$ (ou $N_{ser} > 0$) ou au-dessus de cet axe lorsque $x_c < 0$ (ou $N_{ser} < 0$).



I_c = moment d'inertie, par rapport à la parallèle à l'axe neutre passant par C, de la section homogène réduite A_{cf} :

$$I_c = \int_{A_{cf}} (x_c - \xi)^2 \alpha_e . dA_{cf} = x_c^2 \underbrace{\int_{A_{cf}} \alpha_e . dA_{cf}}_{\frac{1}{x_c}[S_{cf} - S_c]} - 2.x_c \underbrace{\int_{A_{cf}} \xi . \alpha_e . dA_{cf}}_{S_{cf}} + \underbrace{\int_{A_{cf}} \xi^2 . \alpha_e . dA_{cf}}_{I_{cf}}$$

$$I_c = -x_c . S_{cf} - x_c . S_c + I_{cf}$$

ou encore :

$$I_c + x_c . S_c = I_{cf} - x_c . S_{cf}$$

3. Position de l'axe neutre x_c

La force élastique élémentaire a pour valeur :

$$dF = \sigma_\xi . \alpha_e . dA_{cf} = K . \xi . \alpha_e . dA_{cf}$$

En écrivant que le moment des forces élastiques élémentaires est nul en C, on obtient :

$$K \int_{A_{cf}} \xi . \alpha_e . dA_{cf} \left(x_c - \xi \right) = 0$$

$$K . x_c \int_{A_{cf}} \xi . \alpha_e . dA_{cf} - K \int_{A_{cf}} \xi^2 . \alpha_e . dA_{cf} = 0$$

$$K \left[x_c . S_{cf} - I_{cf} \right] = 0 \quad \Rightarrow \quad x_c = \frac{I_{cf}}{S_{cf}}$$

ou encore :

$$I_c + x_c . S_c = I_{cf} - x_c . S_{cf} = 0 \quad \Rightarrow \quad x_c = -\frac{I_c}{S_c}$$

Remarque

Pour les sections rectangulaires ou en T, x_c s'obtient par résolution d'une équation du troisième degré (voir § 2.4.3.1 et 2.4.3.2, chapitre 11 : « Flexion composée », p. 443).

4. Expression du coefficient angulaire K

En écrivant que le moment des forces élastiques élémentaires par rapport à l'axe neutre vaut :

$$M_{ser/AN} = N_{ser} . x_c$$

il vient :

$$N_{ser}.x_c = \int_{A_{cf}} \sigma_\xi.\xi.\alpha_e.dA_{cf} = K\int_{A_{cf}} \xi^2.\alpha_e.dA_{cf} = K.I_{cf}$$

d'où :

$$K = \frac{N_{ser}.x_c}{I_{cf}}$$

Remarque

$N_{ser}.x_c$ est différent de $N_{ser}.e_0 = M_{serG_0} \Rightarrow$ K est différent de $\frac{M_{ser}}{I_{cf}}$ comme c'était le cas en flexion simple.

5. Calcul des contraintes

Pour une section droite quelconque donnée (béton et position des armatures), le processus de calcul s'établit comme suit :

1/ calculer les caractéristiques géométriques de la section par rapport à une parallèle à l'axe neutre passant par le centre de pression C :

$$S_c = -\int_{A_{cf}} (x_c - \xi)\alpha_e.dA_{cf} \Rightarrow S_c(x_c)$$

$$I_c = \int_{A_{cf}} (x_c - \xi)^2 \alpha_e.dA_{cf} \Rightarrow I_c(x_c)$$

2/ en déduire la profondeur de l'axe neutre :

$$x_c = -\frac{I_c(x_c)}{S_c(x_c)}$$

$\Rightarrow$ x_c par résolution de cette équation.

$\Rightarrow$ $x_1 = x_c + c$

3/ faire la vérification des contraintes :

$\sigma_c = K.x_1 \leq \overline{\sigma_c}$ pour les classes d'exposition XD, XF et XS

$\sigma_{s1} = \alpha_e.K(d - x_1) \leq \overline{\sigma_s}$

$\sigma_{s2} = \alpha_e.K(x_1 - d')$